AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO

PROJETO E IMPLANTAÇÃO DE AUTOMAÇÃO EM SISTEMAS DE IRRADIAÇÃO DE ALVOS SÓLIDOS, LÍQUIDOS E GASOSOS EM CÍCLOTRONS VISANDO A PRODUÇÃO DE RADIOISÓTOPOS

SUMAIR GOUVEIA DE ARAUJO

Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Doutor em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Aplicações.

Orientador:
Dr. Valdir Sciani

São Paulo
2001

4

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

PROJETO E IMPLANTAÇÃO DE AUTOMAÇÃO EM SISTEMAS DE IRRADIAÇÃO DE ALVOS SÓLIDOS, LÍQUIDOS E GASOSOS EM CÍCLOTRONS VISANDO A PRODUÇÃO DE RADIOISÓTOPOS

SUMAIR GOUVEIA DE ARAUJO

IPEN
LIVRO
Nº 22232
BIBLIOTECA

Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do grau de Doutor em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear.

Orientador: Dr. Valdir Sciani

SÃO PAULO
2001

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP IPEN

Ao meu marido, Antonio Carlos,
Aos meus filhos, Carlos e Jéssica,
Com todo meu amor.

AGRADECIMENTOS

- A Deus, sobre todas as coisas.

- Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares pela oportunidade da realização deste trabalho.

- À Fundação de Apoio a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte financeiro.

- Ao Centro de Aceleradores Ciclotron, pela oportunidade de realização deste trabalho.

- Ao Dr. Valdir Sciani, meu orientador, pelo incentivo, pelos conselhos e pela dedicação, em todos os momentos. A você, muito obrigada.

- À toda equipe da CPG, pelo apoio e boa vontade no atendimento durante todo o período de realização deste trabalho. A vocês, muito obrigada.

- À Dra. Liliane Landini, pela ajuda técnica-científica prestada, pelo apoio sempre atuante, pela amizade e encorajamento durante o tempo de preparação deste trabalho.

- À Rosemeire dos Santos Almeida pela amizade, colaboração e apoio técnico, muito obrigada.

- Ao Professor Dr. Jiro Takahashi e o Sr. José Carlos de Souza do Depto. de Física Experimental do IFUSP (Instituto de Física da Universidade de São Paulo), pelas sugestões críticas, discussões e inestimável colaboração na elaboração e confecção dos dispositivos mecânicos, o meu muito obrigada.

- Ao Sr. Rui Fernandes Oliveira do Depto. de Materiais do IFUSP, por suas discussões e sugestões técnicas na área de Criogenia, obrigada.

- Ao Centro de Tecnologia de Radiações pela constante colaboração.

- Ao Centro de Radiofarmácia, especialmente ao M.Sc. Jair Mengatti, pela ajuda e sugestões, durante o desenvolvimento deste trabalho.

- Ao Dr. João Alberto Osso Junior, pelas numerosas sugestões, amizade, apoio e estímulo à minha carreira de pesquisadora.

- Ao IEC, especialmente aos funcionários, Edno A. Lenhatti, Edvaldo de Oliveira, Idacir Mantovani e José Carlos Sabino, pela colaboração.

- Às Divisões de Compra, Transporte, o meu muito obrigada.

- Ao Setor de Importação e Exportação, especialmente ao Sr. Washington de Carvalho Lopes, o meu muito obrigada pela ajuda sempre atuante.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP IPEN

AGRADECIMENTOS

- A todas as empresas e respectivos funcionários, que colaboraram durante a execução deste trabalho, permitindo assim, que o mesmo fosse concluído da melhor forma possível: "SENIOR AUTOMAÇÃO", Eng. Amair Sanchez Júnior; "PHOENIX CONTACT", Eng. Dimas R. Simões; "D2 ENGENHARIA", Eng. Luiz Carlos Domingues; "MASTER CONTROL", Eng. Pedro Gídaro e Equipe Técnica; "FESTO AUTOMAÇÃO", Eng. Cláudio Falcão; "SIEMENS", Eng. Paulo Roberto Camargo; "C+ TECNOLOGIA", Equipe Técnica e de Vendas; "INDUSOFT SISTEMAS LTDA"; "RITTAL SISTEMAS ELETROMECÂNICOS"; "TECFLUX LTDA", Representante da SWAGELOK no Brasil; "ELMI TEC ASSISTÊNCIA TÉCNICA E REPRESENTAÇÕES".

- A todos meus amigos, o meu muito obrigada.

- Aos meus pais e irmãos, pelo incentivo, pelo carinho e apoio, por me ampararem ao longo do caminho, durante toda minha vida acadêmica, nem sempre fácil, meu muito obrigada..

- Para minha família, em particular para meu marido, Antônio Carlos, aos meus filhos, Carlos Henrique e Jéssica e aos meus sogros, Rubens e Dalva, pela paciência, pelo apoio e pelo carinho, forças que sempre colaboraram em todos os sentidos. Muito obrigada..

- A todas as outras pessoas, que direta ou indiretamente, contribuíram positivamente para a realização deste trabalho.

COMISSAO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP IPEN

PROJETO E IMPLANTAÇÃO DE AUTOMAÇÃO EM SISTEMAS DE IRRADIAÇÃO DE ALVOS SÓLIDOS, LÍQUIDOS E GASOSOS EM CÍCLOTRONS VISANDO A PRODUÇÃO DE RADIOISÓTOPOS

SUMAIR GOUVEIA DE ARAUJO

RESUMO

Atualmente, dois cíclotrons estão operacionais no IPEN-CNEN/SP: um, modelo CV-28, com capacidade de acelerar p, d, $^{3}He^{++}$ e α, com energias de 24, 14, 36 e 28 MeV, respectivamente, e correntes de feixe de até 30μA; o outro, modelo *Cyclone 30*, acelera prótons com energia de 30MeV e correntes de até 350μA. Ambos têm o objetivo de irradiar alvos tanto para produção de radioisótopos utilizados na Medicina Nuclear (por exemplo, ^{67}Ga, ^{201}Tl, ^{111}In, ^{123}I e ^{18}F), como para pesquisas em geral. Procurou-se, nesse sentido, o desenvolvimento de sistemas de irradiações completamente automáticos, sempre visando a redução da exposição de trabalhadores à radiação e aumento da confiabilidade de utilização destes sistemas, uma vez que esperam-se atividades altíssimas envolvidas nestes processos. Na automação, utilizou-se um Controlador Lógico Programável (CLP) ligado a uma malha de realimentação, para gerenciar todas as variáveis envolvidas nos processos das irradiações. A programação do CLP foi desenvolvida utilizando-se o *Software* Simatic S7, da *Siemens*, onde todas as etapas são supervisionadas em telas em um microcomputador. A confecção e seqüência de encadeamento das fases foram desenvolvidas utilizando o Software aplicativo da *Unisoft*, servindo para manter o operador informado sobre o que está sendo feito, em qualquer tempo particular do processo.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP IPEN

PROJECT AND IMPLANTATION OF AUTOMATION IN IRRADIATION SYSTEMS FOR SOLID, LIQUID AND GASEOUS TARGETS IN CYCLOTRONS AIMING THE PRODUCTION OF RADIOISOTOPES

SUMAIR GOUVEIA DE ARAUJO

ABSTRACT

Nowadays, two cyclotron are being operated at IPEN-CNEN/SP: one model CV-28, capable of accelerating p, d, $^{3}He_{4}$ and α, with energies of 24, 14, 36 and 28MeV, respectively, and beam currents up to 30 μA; the other one, model Cyclone 30, accelerates protons with energy of 30MeV and currents up to 350μA. Both have the objective of irradiating targets both for radioisotope production for use in Nuclear Medicine, such as ^{67}Ga, ^{201}Tl, ^{111}In, ^{123}I, ^{18}F, and general research. The development of irradiating systems completely automatic was the objective of this work, always aiming to reduce the radiation exposition dose to the workers and to increase the reliability of use of these systems, because very high activities are expected in these processes. In the automation, a Programmable Logical Controller (PLC) was used connected to a feedback net, to manage all the variables involved in the irradiation processes. The program of the PLC was developed using Simatic Step Seven (S7), Software from Siemens, where all the steps are supervised in screens at a microcomputer. The assembling and sequence of leading were developed using the software from Unisoft, that keeps the operator informed about the work being carried out, at any processing time.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS 1

1.2 OBJETIVOS 3

1.3 ORIGINALIDADE 4

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS E REVISÃO DA LITERATURA

2.1 PRODUÇÃO DE RADIOISÓTOPOS 6

2.1.1 Aceleradores na Produção de Radioisótopos 7

2.1.1.1 Ciclotrons de Íons Positivos (clássicos) 7

2.1.1.2 Ciclotrons de Íons Negativos 8

2.1.2 Alvos 9

2.1.2.1 Tipos de Alvos Utilizados na Produção de Radioisótopos em Ciclotrons 10

2.1.2.1.1 Alvos Sólidos 11

2.1.2.1.2 Alvos Líquidos 12

2.1.2.1.3 Alvos Gasosos 12

2.1.2.2 Sistemas de Alvos Utilizados em Ciclotrons 13

2.1.2.2.1 Sistemas para Irradiações com Feixes Internos 13

2.1.2.2.2 Sistemas para Irradiações com Feixes Externos 14

2.2 AUTOMAÇÃO *15*

2.2.1 Interface Homem-Máquina *16*

2.2.1.1 Interface Gráfica Interativa 18

2.2.1.2 Interface Homem-Máquina com Microprocessadores 19

2.2.1.3 Configuração 19

2.2.1.4 Sistema de Monitoração de Parâmetros de Segurança 20

2.3 REVISÃO DE LITERATURA 21

2.3.1 Alvos e Porta-alvos 21
2.3.2 Sistema de Automação 28
2.3.2.1 Automação Geral 28
2.3.2.2 Automação em Alvos 32

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 INFRA-ESTRUTURA 41

3.1.1 Ciclotron CV-28 e Cyclone 30 do IPEN CNEN/SP 41
3.1.1.1 Ciclotron modelo *CV-28* 41
3.1.1.2 Ciclotron modelo *Cyclone 30* 47

3.2 SISTEMA DE IRRADIAÇÃO DE ALVOS 55

3.3 PROJETO DE PORTA-ALVOS 58

3.3.1 Porta-alvo para Irradiação de Alvos Sólidos 58
3.3.2 Porta-alvo para Irradiação de Alvos Gasosos 60
3.3.3 Porta-alvo para Irradiação de Alvos Líquidos 63

3.4 DESCRIÇÃO DOS PROCEDIMENTOS USADOS NO PROCESSO DOS TRÊS PORTA-ALVOS 68

3.5 AUTOMAÇÃO DO SISTEMA DE IRRADIAÇÃO DE ALVOS SÓLIDOS, LÍQUIDOS E GASOSOS 71

3.5.1 Descrição do Sistema 71
3.5.2 Desenvolvimento e Montagem do Sistema 72
3.5.3 Arquitetura do Sistema de Automação 72
3.5.3.1 Arquitetura do Hardware 76
3.5.3.1.1 Arquitetura do Hardware – nível 1 (Controle dos Equipamentos) 76
3.5.3.1.2 Arquitetura do *Hardware* – nível 2 (Controle do Processo) 82
3.5.3.1.3 Arquitetura do *Hardware* – nível 3 (Gerenciamento do Processo) 87
3.5.3.2 Arquitetura do Software 89

3.5.3.2.1 Arquitetura do *Software* – nível 2 (Controle do Processo) 89
3.5.3.2.2 Arquitetura do *Software* – nível 3 (Gerenciamento do Processo) 96

3.6 TESTES OPERACIONAIS 101

3.6.1 Testes Operacionais do Sistema de Automação 101
3.6.1.1 Testes em Vazio 102
3.6.1.2 Testes com Carga 103
3.6.2 Instalação do Sistema no Ciclotron CV-28 103
3.6.3 Ensaios com os Porta-alvos 104

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CONFECÇÃO E MONTAGEM DOS PORTA-ALVOS 106

4.1.1 Porta-alvo para Irradiação de Alvos Sólidos 106
4.1.2 Porta-alvo para Irradiação de Alvos Gasosos 107
4.1.3 Porta-alvo para Irradiação de Alvos Líquidos 109

4.2 MONTAGEM E DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE AUTOMAÇÃO111

4.2.1 Montagem do Hardware 111
4.2.1.1 Montagem do Hardware – nível 1 – Controle dos Equipamentos 111
4.2.1.2 Montagem do Hardware – nível 2 (Controle do Processo) 113
4.2.1.3 Montagem do Hardware – nível 3 (Gerenciamento do Processo) 115
4.2.2 Configuração do Software *116*
4.2.2.1 Configuração do *Software* – nível 2 (Controle do Processo) 116
4.2.2.2 Configuração do *Software – nível 3 (Gerenciamento do* Processo) 119

4.3 OPERACIONALIDADE *128*

4.3.1 Operacionalidade do Sistema de Automação 128
4.3.1.1 Operações em Vazio 129
4.3.1.2 Operações com Carga 130

4.3.2. Operacionalidade dos Porta- Alvos 131
4.3.2.1 Porta-alvo Sólido 133
4.3.2.2 Porta-alvo Gasoso 133
4.3.2.3 Porta-alvo Líquido 134
4.3.3. Considerações Finais *135*

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES **141**

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

..... **143**

APÊNDICE

..... **154**

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Radioisótopos produzidos em Cíclotrons mais usados na Medicina Nuclear.....6

Tabela 2.2 Tipos de Aceleradores.....9

Tabela 3.1 Características Nominais do Cíclotron CV-28 do IPEN-CNEN/SP.43

Tabela 3.2 Características Nominais do Cíclotron Cyclone 30 do IPEN-CNEN/SP.....53

Tabela 3.3 Especificações Técnicas da CPU 314.....85

Tabela 4.1 Comparação entre o Comando Convencional com Relé e o Comando com Lógica de CLP..... 136

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Representação Esquemática de um Cíclotron Clássico.....8

Figura 3.1 Câmara de Aceleração do Cíclotron CV-28 e Sistema de Transporte de Feixe instalados na Caverna... 42

Figura 3.2 Câmara de vácuo do Cíclotron CV-28.....46

Figura 3.3 Vista esquemática do *Cíclotron* CV-28 e o Sistema de Transporte de Feixe. No desenho são apresentadas apenas duas linhas externas, para não sobrecarregar a figura... 47

Figura 3.4 Trajetória da partícula no Cyclone 30, para diferentes níveis de energia.....48

Figura 3.5 Desenho esquemático do Cyclone 30, mostrando todos os seus sistemas... 51

Figura 3.6 Cyclone 30 instalado no IPEN-CNEN/SP, quando ainda estava nas dependências da fábrica da *IBA*, na Bélgica... 52

Figura 3.7 Localização dos Cíclotrons CV-28 e Cyclone 30 do IPEN-CNEN/SP. 54

Figura 3.8 Distribuidor Magnético, Linhas de Feixe e Local onde foram montados os Sistemas de Irradiação do Cíclotron CV-28 do IPEN-CNEN/SP.....56

Figura 3.9 Diagrama esquemático de um Sistema típico de Irradiação de Alvos.....56

Figura 3.10 Desenho esquemático do Porta-alvo para Irradiação de Alvos Sólidos... 59

Figura 3.11 Desenho esquemático do Porta-alvo para Irradiação de Alvos Gasosos... 61

Figura 3.12 Sistema de bombeamento do gás (via método criogênico), com *dewar* de aço inoxidável, acionado por um cilindro pneumático..62

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP IPEN

Figura 3.13 Sistema de geração de vapor, lavagem e coleta do alvo.....63

Figura 3.14 Desenho esquemático do Porta-alvo para Irradiação de Alvos Líquidos... 64

Figura 3.15 Esquema da câmara de isolamento e acoplamento do porta-alvo criogênico.....66

Figura 3.16 Dispositivo Mecânico de Rotação do Porta-Alvo Líquido. 67

Figura 3.17 Processo de Controle do Porta-alvo Sólido... 69

Figura 3.18 Processo de Controle do Porta-alvo Gasoso.....70

Figura 3.19 Processo de Controle do Porta-alvo Líquido. 71

Figura 3.20 Diagrama de Blocos do Sistema Integrado utilizado no Desenvolvimento da Automação... 72

Figura 3.21 Pirâmide do Sistema de Automação.. 73

Figura 3.22 Arquitetura do *Hardware* com os três níveis aplicados neste projeto.....76

Figura 3.23 Desenho esquemático do Painel de Campo 78

Figura 3.24 Esquema do CLP *SIMATIC S7-300*, da *Siemens*, aplicado neste projeto.....84

Figura 3.25 Exemplo de Configuração Típica da Linguagem *Ladder*, para parte da etapa da carga do porta-alvo gasoso... 90

Figura 3.26 Exemplo de Configuração Típica da Lista de Instruções, para parte da etapa da carga do porta-alvo gasoso. 91

Figura 3.27 Configuração Típica do Diagrama de Blocos de Função, para parte da etapa da carga do porta-alvo gasoso... 92

Figura 3.28 Diagrama de Bloco da Seqüência de Operação – Alvo Sólido. 93

Figura 3.29 Diagrama de Bloco da Seqüência de Operação – Alvo Líquido. ...94

Figura 3.30 Diagrama de Bloco da Seqüência de Operação – Alvo Gasoso.....95

Figura 3.31 Biblioteca de Símbolos do *Unisoft*, mostrando um grupo de válvulas. 98

Figura 3.32 Biblioteca de Símbolos do *Unisoft*, mostrando uma janela de construção e/ou desenvolvimento de telas. 99

Figura 4.1 Porta-alvo Sólido Confeccionado... 106

Figura 4.2 Porta-alvo Gasoso Confeccionado. 107

Figura 4.3 Sistema de Carregamento, Recuperação Emergência do Gás Criptônio 108

Figura 4.4 Porta-alvo Líquido (Criogênico) Confeccionado. 109

Figura 4.5 Sistema Injetor de Pressurização de Água em forma de Spray. ... 110

Figura 4.6 Dispositivo Mecânico para Rotação do Porta-alvo Líquido... 110

Figura 4.7 Vistas laterais, frontal e traseira do Painel de Campo. 111

Figura 4.8 Terminais de Válvulas do Tipo CPV... 112

Figura 4.9 Painel de Controle dos Sistemas de Irradiação de Alvos Sólidos Líquidos e Gasosos 113

Figura 4.10 Montagem da Arquitetura do *Hardware* – nível 3, utilizado no Gerenciamento do Processo de um alvo. 115

Figura 4.11 Tela da Abertura do Projeto, Configuração do *Hardware* e Lista com Definições de Endereços... 117

Figura 4.12 Descrição dos elementos de comando e a função de cada linha de programa, utilizando o *Software* SIMATIC *S7*, da SIEMENS. ... 118

Figura 4.13 Tela de construção do sistema supervisório para o alvo líquido, com as janelas de ferramentas para confecção. 121

Figura 4.14 Relação de variáveis e estados e disposição dos dados no supervisório 122

Figura 4.15 Tela construída para o gerenciamento do processo de irradiação de alvos líquidos (etapa de "Rotação"). 123

Figura 4.16 Tela construída para o gerenciamento do processo de irradiação de alvos gasosos... 124

Figura 4.17 Tela construída para o gerenciamento do processo de irradiação de alvos sólidos... 124

Figura 4.18 Apresentação do sistema já desenvolvido e implementado com o microcomputador instalado no Painel de Controle, especialmente projetado para esta aplicação. 125

Figura 4.19 Tela de alarmes desenvolvida, para visualização das falhas, que eventualmente podem ocorrer durante o processo, e a forma pela qual são comunicadas ao operador... 126

Figura 4.20 Tela desenvolvida para a obtenção das tendências com as principais variáveis dos parâmetros do feixe. 127

Figura 4.21 Modelo do relatório desenvolvido para acompanhamento dos parâmetros envolvidos no processo de irradiação..... 128

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

O estudo contínuo da energia nuclear tem proporcionado o desenvolvimento de diversas técnicas de aplicações. Dentre estas, devido à sua crescente utilização pela sociedade, pode-se destacar a produção de radioisótopos para uso na Medicina Nuclear em diagnóstico e terapia, como fontes de calibração na metrologia e como traçadores radioativos.

Nos últimos anos, verificou-se um rápido crescimento no uso de aceleradores de partículas para este propósito, em especial o uso de cíclotrons compactos, com os quais tem-se a vantagem de produzir radioisótopos de meia-vida curta e alta atividade específica [1,2,3,4,5,6,7,8].

Atualmente, dois cíclotrons estão operacionais no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) e são gerenciados pelo Centro de Aceleradores cíclotron (CAC) : um, de íons positivos, modelo *CV-28*, fabricado pela empresa Americana *The Cyclotron Corporation (TCC)* e outro, de íons negativos, modelo *Cyclone 30*, fabricado pela empresa Belga *Ion Beam Applications (IBA)*.

O modelo CV-28, do tipo isócrono, compacto, de energia variável, é uma fonte de radiação capaz de acelerar prótons (p), dêuterons (d), $^{3}He^{++}$ e partículas alfa (α) com energia máxima de 24, 14, 36 e 28 MeV, respectivamente, e está em operação desde 1982[9]. Devido à sua versatilidade, tem grande aplicação em pesquisas em geral, nos campos da Medicina Nuclear (principalmente na obtenção de radioisótopos de meia-vida curta), nas áreas de análise por ativação, em física nuclear e em estudos de danos de radiação em metais e ligas metálicas, etc.

O segundo cíclotron instalado, o modelo Cyclone 30, em operação desde 1999, do tipo íon negativo H^-, possui capacidade de acelerar prótons com energia

máxima de 30MeV, corrente de até 350μA, com objetivo principal de produzir radioisótopos em escala suficiente para suprir o mercado dos radioisótopos mais utilizados em Medicina Nuclear: ^{67}Ga, ^{201}Tl, ^{111}In, ^{123}I e ^{18}F. Atualmente, é produzido rotineiramente ^{18}F e estão sendo efetuados os primeiros ensaios para a produção rotineira de ^{123}I e ^{67}Ga. Prevê-se o início de produção de ^{201}Tl em 2001.

Com a entrada em funcionamento do Cyclone 30, o modelo CV-28 está sendo destinado exclusivamente para pesquisas em geral, seja do próprio CAC, seja de outros Departamentos do IPEN ou da Universidade de São Paulo (USP), principalmente do Instituto de Física (IFUSP), para o qual diversas irradiações têm sido efetuadas.

No caso do Cyclone 30, existem duas linhas de feixe externo. Uma é destinada à irradiação de alvos sólidos. Na outra, está instalado um distribuidor magnético, com cinco saídas, onde outras formas físicas de alvos podem ser irradiadas (sólidos, líquidos ou gasosos).

Em ambos os casos, o CAC tem desenvolvido dispositivos especiais que permitem a realização destas irradiações nas condições necessárias: energia e corrente do feixe, forma física do alvo, etc.

O CAC tem interesse no desenvolvimento de sistemas completamente automáticos, que possam ser utilizados pelo maior número de usuários possível, sempre visando a redução da exposição do pessoal à radiação e a praticidade de utilização, uma vez que se esperam atividades altíssimas envolvidas nestes processos. Estes sistemas devem permitir a irradiação de alvos nos três estados físicos: sólido, líquido e gasoso. Particularmente, para o CAC, esforços estão sendo voltados para o desenvolvimento destes sistemas. Também, é de interesse o desenvolvimento de sistemas que permitam a monitoração do feixe, tanto da energia e corrente de feixe quanto de sua homogeneidade, parâmetros de vital importância, independente do tipo de experimento realizado.

1.2 OBJETIVOS

Visando os usuários de pesquisa no ciclotron CV-28 e a utilização das cinco saídas do distribuidor magnético destinadas à produção comercial de radioisótopos, a presente proposta visa dominar a tecnologia de automação de alvos, fundamentada em um trabalho de engenharia, onde se busca o desenvolvimento tecnológico de um sistema de produção, vinculado à sua viabilidade econômica. O desenvolvimento desta tecnologia também vai ao encontro de um melhor aproveitamento do investimento feito pelo IPEN, que foi a aquisição do ciclotron Cyclone 30.

Um dos fatores que levaram à decisão de realizar a automação do sistema de irradiação de alvos sólidos, líquidos e gasosos, foi a competitividade existente no mercado atual, onde a excelência de uma produção e a otimização de processos são estratégias importantes de sobrevivência. Mas, para alcançar estas metas, muitas vezes são exigidas soluções nas quais a automação deve estar presente, de forma que se ajustem da melhor maneira às necessidades.

Sabe-se que há duas principais razões para automação de alvos e de processamento: redução da exposição de trabalhadores à radiação e aumento da confiabilidade do método. Quando a operação remota e/ou automática não é utilizada, o operador é quem decide quando ativar uma válvula ou passar para a próxima etapa, possibilitando desta maneira, a propensão à ocorrência de um eventual erro.

Controladores Lógicos Programáveis (CLP's), ligados a malhas de realimentação, podem ser usados para controlar todas as condições de processos e decidir o que deve ser feito. Assim, diversos parâmetros, tais como, temperatura, pressão, vácuo, fluxo de gás e de líquido entre outros, precisam ser monitorados, a fim de proporcionar dados para controle de processos. Todas estas etapas podem ser automatizadas, contanto que sensores apropriados garantam que controles contínuos estejam disponíveis.

No presente trabalho, todos os elementos do sistema são controlados por uma única unidade para todos os tipos de alvos. Uma vantagem, é que este controle pode ser feito por um operador em um terminal único e consiste em um processo completo, desde o início da operação: carregamento do alvo, acompanhamento da irradiação, o subseqüente descarregamento do alvo e finalmente, o envio dele para processamento químico. Todas as etapas do processo aparecem em uma tela e servem para manter o operador informado sobre o que está sendo feito, em qualquer tempo particular. Assim, se os parâmetros estiverem dentro dos limites preestabelecidos, o processo continua. Caso contrário, um programa tenta corrigí-lo, para trazê-lo dentro dos limites permitidos.

1.3 ORIGINALIDADE

Conforme enfatizado nos objetivos, o trabalho visa a aproveitar o investimento feito pelo IPEN, que foi a aquisição de um novo cíclotron, destinado à produção de radioisótopos, que proporcionou a utilização do cíclotron CV-28 somente para pesquisas e uma linha de irradiação no Cyclone 30, com possibilidade de irradiações de alvos nos três estados físicos.

Em relação à automação de alvos, diversos trabalhos têm sido publicados[10,11,12,13,14] e alguns sistemas estão disponíveis comercialmente. Os comerciais, geralmente são projetados para um determinado tipo de radioisótopo, não podendo ser usado como um padrão geral.

A proposta apresentada possui diversos pontos que devem ser enfatizados:
- Sistema totalmente automático, unificado, para todos os tipos de alvos: sólidos, líquidos e gasosos.
- Correção automática de valores da faixa preestabelecida ou dispositivo de alarme, quando a anomalia não puder ser automaticamente corrigida. No caso de ocorrer uma anomalia, isto é, se algum dado de realimentação ao controle central apresentar valor fora da faixa preestabelecida, primeiro o sistema tenta corrigir esta falha, caso contrário, um alarme indica a anomalia. Algumas falhas que podem ocorrer são, por exemplo, preenchimento incompleto da câmara de

um alvo líquido, deficiência de refrigeração, aumento de temperatura e pressão, etc. Entende-se duas operações nesse exemplo:

- programa de controle tentará corrigir, mas não é tecnicamente possível;
- alarme indica anomalia e conseqüente interferência do operador.

- Os sistemas comerciais nem sempre apresentam uma confiabilidade em termos de segurança operacional do tipo realimentação de dados, confirmando que a seqüência de operação foi completada. Exemplo: No sistema de controle para irradiação de água, visando a produção de ^{18}F, fornecido pela "*Ion Beam Applications*" - Bélgica e adquirido pelo IPEN, o preenchimento do alvo é feito durante 120 segundos. Durante este tempo, aparece na tela do computador a válvula, para enchimento, aberta, mas é apenas uma indicação elétrica. Um travamento mecânico desta válvula não é acusado e a câmara do alvo, portanto, não é preenchida. Mesmo assim, o processo pode ser continuado. No envio do material irradiado para o módulo de processamento ocorre o mesmo. No presente trabalho, propôs-se um sistema que também corrigisse estas falhas.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS E REVISÃO DA LITERATURA

2.1 PRODUÇÃO DE RADIOISÓTOPOS

Os radioisótopos podem ser aplicados em muitos campos, particularmente em Medicina, Biologia e na Indústria. Ao contrário da pesquisa básica fundamental envolvendo isótopos radioativos, os estudos que visam suas aplicações requerem que eles estejam disponíveis em quantidade suficiente e com alta pureza [15,16].

Na Medicina, em particular, os radioisótopos podem ser utilizados tanto em terapia como em diagnóstico e possuem uma série de restrições para sua escolha: meia-vida, natureza e energia da radiação, comportamento biológico do produto, compatibilidade com o desempenho do equipamento e o tipo do exame a ser efetuado. Estas restrições levam à utilização de radioisótopos com meia-vida variando de minutos até dias [15,16,17,18,19]. A Tabela 2.1 mostra os radioisótopos produzidos em ciclotrons mais usados na Medicina Nuclear.

Tabela 2.1 - Radioisótopos produzidos em Ciclotron mais usados na Medicina Nuclear [15,17,18].

Nuclídeo	Meia-Vida	Aplicação	Exemplos de Uso
^{11}C	20,4 min	PET	Imagem e metabolismo cerebral
^{13}N	9,96 min	PET	Imagem do miocárdio, metabolismo cerebral
^{15}O	2,03 min	PET	fluxo sangüíneo, metabolismo cerebral
^{18}F	110 min	PET	Metabolismo cerebral e do miocárdio, localização de tumores malignos que têm metabolismo interno de glicose
^{67}Ga	3,2 d	SPET	Localização de tumores em tecidos moles e lesões inflamatórias
^{111}In	2,8 d	SPET	Marcação de biomoléculas
^{123}I	13 h	SPET	Imagem da tireóide, localização de tumores supra-renais
^{201}Tl	3,1 d	SPET	Imagem do miocárdio
$^{81}Rb/^{81m}Kr$	4,58 h / 13 s	SPET	ventilação pulmonar

PET (Tomografia por Emissão de Pósitrons) e SPET (Tomografia por Emissão de Fóton Único) são técnicas de imagens, que usam radioisótopos primários ou moléculas marcadas, para mapear interações moleculares de processos biológicos in vivo [20].

2.1.1 Aceleradores na Produção de Radioisótopos

A maioria dos aceleradores usados para produção de radioisótopos são cíclotrons isócronos. O cíclotron foi inventado por E.O.Lawrence, em 1930[21], e sua teoria foi desenvolvida completamente nos anos 60 e tais máquinas têm sido construídas seguindo o mesmo projeto conceitual: o cíclotron isócrono compacto. No meio da década de 80, mais de cem aceleradores deste tipo foram instalados em universidades, com energia variável, sendo capazes de acelerar mais de uma partícula (p,d,$^3He^{++}$,α), projetados para pesquisas em física nuclear, radioquímica e outras aplicações. Existem dois tipos de cíclotrons [15,22].

2.1.1.1 Cíclotron de Íons Positivos (clássicos)

Neste acelerador, as partículas são geradas por uma fonte de íons (H^+ no caso de prótons e dêuterons ou He^{++} no caso de $^3He^{++}$ e α), no centro da câmara de vácuo (tanque do cíclotron) composta de dois eletrodos em forma de "dês", que estão entre os pólos de um grande eletroimã. Este último cria um campo magnético perpendicular aos eletrodos. Estes eletrodos estão ligados a uma fonte de tensão alternada de alta freqüência (RF), a qual cria um campo elétrico entre eles. Os íons são acelerados, fazendo uma trajetória em forma de espiral, dada pela combinação dos campos elétrico e magnético. O campo magnético força os íons a apresentarem trajetórias circulares e perpendiculares a este campo e o campo elétrico faz com que eles sejam acelerados, até atingir o canal de extração, que é composto por um defletor eletrostático feito com uma chapa de cobre aterrada muito fina (0,3 a 0,7mm) e um eletrodo negativo paralelo localizado a uma distância de cerca de 3mm, para produzir um alto campo eletrostático necessário (150 kV/cm) e extrair as últimas órbitas da partícula. Nos melhores casos, somente 50 a 70% podem ser extraídos. Isto é adequado para uma produção modesta de radioisótopos, mas está muito longe de ser suficiente para o fornecimento comercial. A Figura 2.1 mostra a representação esquemática de um cíclotron clássico [15].

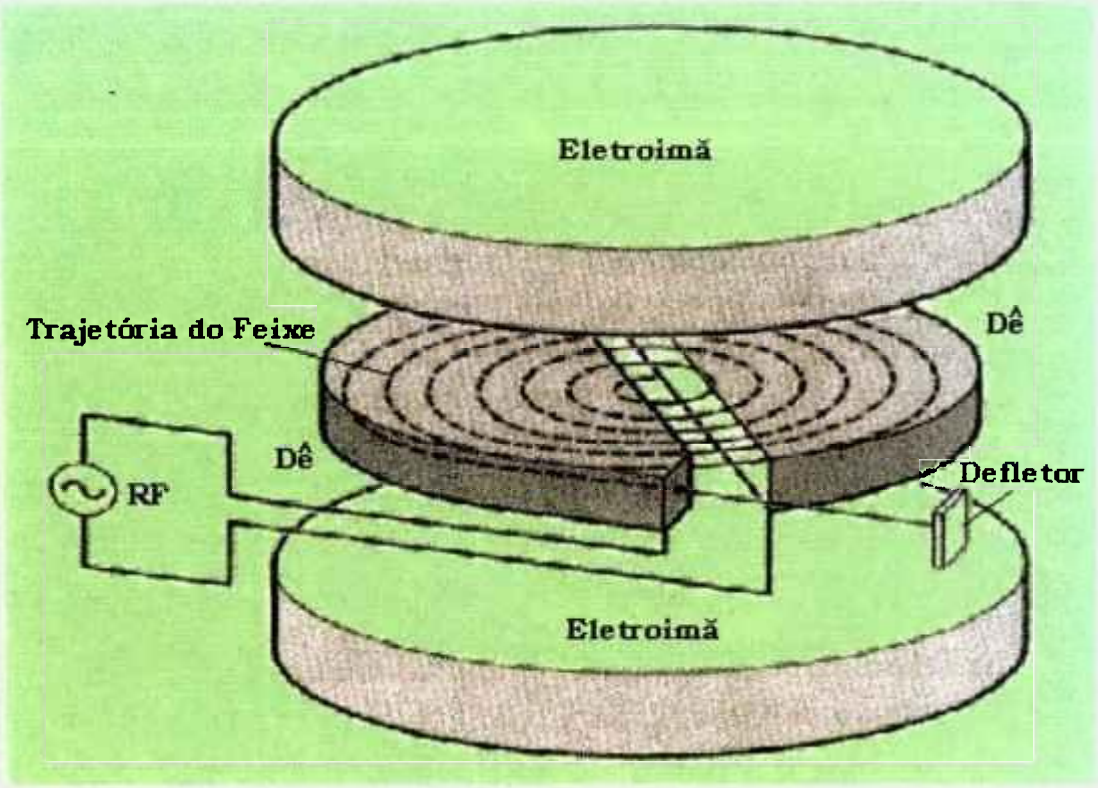


Figura 2.1: Representação Esquemática de um Cíclotron Clássico.

2.1.1.2 Cíclotrons de Íons Negativos

A partir da década de 80 começaram a ser desenvolvidos os cíclotrons H^-. O projeto foi baseado em uma máquina clássica de próton, mas a fonte de partículas era uma fonte de íons H^- e a extração obtida com uma eficiência muito próxima de 100%, por meio de uma folha fina de carbono ("*Stripper*") que troca a carga do íon negativo passando de H^- para H^+. Esta mudança de carga faz com que a força magnética passe a atuar em sentido oposto, desviando o feixe para fora do tanque. As primeiras máquinas demostraram sua eficiência com 200 μA, facilmente extraídos, e também com a possibilidade de se irradiar dois alvos simultaneamente em sentidos opostos. Uma grande variedade de aceleradores pode ser usada na produção de radioisótopos, como pode ser visto na Tabela 2.2 [15,22].

Tabela 2.2 - Tipos de Aceleradores [16].

Classificação	Características	Energia Prótons (MeV)	Radioisótopos mais Produzidos
nível I	Partícula única (p ou d)	≤11	^{11}C,^{13}N,^{15}O,^{18}F
nível II	Partícula múltipla ou única (p,d)	≤20	^{11}C,^{13}N,^{15}O,^{18}F (^{123}I, ^{67}Ga)
nível III	Partícula múltipla ou única (p,d,^{3}He,^{4}He)	≤40	^{38}K,^{73}Se, $^{75-77}Br$, ^{123}I,^{67}Ga, ^{109}Cd, ^{81}Rb(^{81}Kr),^{111}In, ^{201}Tl,^{22}Na, ^{57}Co
nível IV	Partícula múltipla ou única (p,d,^{3}He,$^{3}He^{++}$, α)	≤100	^{123}I,^{72}Se(^{72}As), ^{82}Sr(^{82}Rb) ^{117m}Sn
nível V	Partícula única (p)	≥200	^{26}Al, ^{32}Si, ^{44}Ti, ^{67}Cu, ^{68}Ge(^{68}Ga), ^{82}Sr(^{82}Rb), etc.

Os cíclotrons de tamanho médio (nível III, E≤40 MeV) são particularmente importantes, pois muitos radioisótopos comumente empregados em Medicina Nuclear, tais como, ^{67}Ga, ^{111}In, ^{123}I e ^{201}Tl, são produzidos em aceleradores deste tipo. Nesta classe, estão incluídos os dois cíclotrons instalados no IPEN.

2.1.2 Alvos

Um dos problemas fundamentais na irradiação de alvos em aceleradores é que a densidade de potência efetiva ser muito alta: altas correntes de feixe incidem em pequenas áreas, tipicamente inferiores a 1 cm^2, havendo necessidade de uma refrigeração adequada. Por exemplo, uma corrente de feixe de 30 μA de prótons com 24 MeV de energia dissipa uma potência de 720 W. Em 1 cm^2, isto significa uma densidade de potência de 720 W/cm^2. Além do problema da transferência de calor, que é um requisito básico na produção de radioisótopos em aceleradores, existem outras considerações igualmente importantes [4,16,23]:

- conhecimento dos dados nucleares, para otimização do método de produção;

- conhecimento das propriedades químicas e mecânicas do material do alvo;

- capacidade do alvo para suportar altas correntes de feixe;

- facilidade de separação química do produto radioativo;

O conhecimento dos dados nucleares é fundamental na determinação da reação nuclear mais conveniente para uma determinada produção, definindo parâmetros importantes a saber, a seleção da energia do feixe e espessura do alvo, de modo a ter o maior rendimento possível do isótopo de interesse, com o mínimo possível de impurezas presentes. Para uma determinação precisa destes parâmetros, torna-se necessário o conhecimento das funções de excitação das várias reações que podem ser produzidas simultaneamente pela partícula incidente.

Além disto, as propriedades mecânicas e químicas do material alvo desempenham papel tão importante quanto ao da influência da secção de choque de uma reação nuclear: Podem ser utilizados metais, ligas, óxidos, líquidos e gases, contanto que resistam a altas correntes de feixe, não sofram fortes alterações químicas induzidas pela radiação, produzam alto rendimento do radioisótopo de interesse e permitam uma fácil separação química. Normalmente, isto leva à utilização de alvos com isótopos enriquecidos [23].

2.1.2.1 Tipos de Alvos Utilizados na Produção de Radioisótopos em Cíclotrons

Um sistema típico de alvo consiste basicamente de [23]:

a) uma janela que separa o vácuo do cíclotron do material alvo;

b) o material alvo (sólido, líquido ou gás);

c) o porta-alvo e uma flange, que é isolada eletricamente para medida da intensidade de corrente;

d) um sistema de refrigeração, para janela do alvo e *beam stopper*, que garanta uma dissipação de calor eficiente. Isto também inclui a seleção de materiais suporte para alvos sólidos e materiais para o corpo principal de alvos líquidos e gasosos.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP IPEN

Além disso, um sistema típico de alvo deve ser compatível com os materiais utilizados, tanto na irradiação quanto na separação química, isto é, com os materiais utilizados no processo de produção.

Serão descritos a seguir os tipos de alvos utilizados em ciclotrons.

2.1.2.1.1 Alvos Sólidos

No caso de alvos na forma sólida, o material ideal deve ter alta estabilidade, alto ponto de fusão, alta condutividade térmica, que permita uma transferência de calor eficiente na interface do alvo e suporte. Por exemplo, no caso de alvo eletrodepositado, para melhorar a transferência de calor, coloca-se o alvo com uma determinada inclinação e não perpendicular em relação ao feixe incidente. Isto proporciona uma menor densidade de corrente efetiva (corrente distribuída numa área maior) e uma espessura menor de material eletrodepositado.

Além de alvos metálicos, óxidos, carbonatos e outros compostos químicos, que são termicamente estáveis, podem também ser utilizados, em alguns casos, sais fundidos (NaCl) [3,4,15,19,22,23].

Normalmente, quando o material é usado na forma metálica (alvos eletrodepositados) a refrigeração 2π é suficiente, isto é, refrigeração na parte posterior da placa suporte. No caso de materiais com baixa condutividade térmica, por exemplo, óxidos, a refrigeração 4π é necessária, ou seja, também na parte frontal do alvo [21]. Um exemplo de alvo sólido com refrigeração 4π é o utilizado para a obtenção do ^{123}I a partir do material alvo TeO_2, enriquecido em ^{124}Te, e fundido em placa de platina. Por ser um óxido, não é um bom condutor de calor [24].

2.1.2.1.2 Alvos Líquidos

Diversas características podem ser mencionadas para que um composto líquido possa ser utilizado como um alvo [25,26]:

a) Ter um ponto de ebulição alto, de modo a suportar a densidade de potência efetiva transmitida pelo feixe de íons durante a irradiação;

b) Ter uma porcentagem alta de átomos do alvo propriamente dito, para aumentar o rendimento de produção;

c) Ser estável nas temperaturas atingidas durante a irradiação;

d) Ser resistente tanto química quanto fisicamente em relação à irradiação;

Um exemplo típico de alvo líquido é o de $H_2{}^{18}O$, utilizado na produção de ^{18}F por intermédio da reação nuclear $^{18}O(p,n)^{18}F$ [4].

2.1.2.1.3 Alvos Gasosos

Como características básicas, os alvos gasosos devem [4,11,25]:

a) Possuir, de preferência, abundância isotópica alta no elemento alvo, em função do radionuclídeo de interesse, uma vez que gases enriquecidos em determinados isótopos são excessivamente caros e exigem uma tecnologia de alvo complicada;

b) Não ser de natureza explosiva;

c) Ser ultrapuros, uma vez que se deseja uma atividade específica alta.

A utilização de altas intensidades de correntes em alvos gasosos resulta em uma redução na densidade do gás ao longo da direção do feixe, que sofre um alargamento devido ao espalhamento. Desta forma, é conveniente a utilização de alvos cônicos, que têm a vantagem adicional de necessitar de uma quantidade menor de gás, sendo importante quando se utilizam isótopos enriquecidos [21]. As dimensões do porta-alvo, bem como a pressão de gás utilizada devem ser selecionadas de modo que o intervalo de degradação de energia do feixe ao longo do gás coincida com o intervalo mais conveniente da função de excitação para a produção do radioisótopo desejado. Com a utilização de alvos gasosos podem ser

produzidos radioisótopos emissores β^+ como ^{11}C , ^{15}O e também ^{18}F pela reação $^{20}Ne(d,\alpha)^{18}F$.

2.1.2.2 Sistemas de Alvos Utilizados em Cíclotrons

A tecnologia relativa a alvos, para irradiações em cíclotrons, destinados à produção de radioisótopos usados em medicina nuclear, está suficientemente avançada. Qaim [4,16] fez uma revisão destes sistemas usados rotineiramente, dividindo-os em dois grupos principais. Os alvos para irradiações com feixes internos e com feixes externos serão descritos a seguir.

2.1.2.2.1 Sistemas para Irradiações com Feixes Internos

Como o próprio nome sugere, as irradiações com feixes internos são feitas no tanque principal do cíclotron, nas últimas órbitas do feixe, antes que ele seja extraído. Este tipo de sistema é importante em cíclotrons de íons positivos, que utilizam defletor eletrostático, o qual limita a intensidade de corrente extraída. Devido a dificuldades práticas relacionadas com a instalação de sistemas de irradiações no interior do cíclotron, não são irradiados com feixe interno os alvos líquidos e os gasosos. Normalmente são utilizados metais, alvos eletrodepositados e ligas que possuem boa condutividade térmica. O feixe interno não permite desfocalização e seu posicionamento no alvo pode apresentar algumas dificuldades, considerando-se particularmente, irradiações com diferentes partículas. Neste caso, a utilização de um termopar pode auxiliar a superar esta dificuldade. Diversos radioisótopos podem ser produzidos com feixe interno, por exemplo, ^{67}Ga, $^{75\text{-}77}Br$, ^{111}In,.^{201}Tl, etc.[1].

2.1.2.2.2 Sistemas para Irradiações com Feixes Externos

A maior parte das irradiações em cíclotrons, que visam a produção de radioisótopos para medicina nuclear, é feita utilizando feixes externos, onde existe mais versatilidade na forma do feixe extraído do que no feixe interno.

Neste caso, torna-se possível o uso de sistemas de desfocalização e varredura para o feixe, com a finalidade de diminuir a densidade de potência (kW/cm^2) efetiva no alvo, isto é, tornar o feixe homogêneo. Com o feixe externo, podem ser irradiados materiais nos três estados físicos: sólidos, líquidos e gasosos. A escolha da forma física do alvo depende de uma série de fatores, dentre os quais o tipo de cíclotron disponível, que determina os tipos de partículas aceleradas e a energia delas e o rendimento da reação. Um caso típico é o ^{123}I, que pode ser produzido por inúmeros processos [27], utilizando-se alvos sólidos e gasosos. No primeiro caso (alvos sólidos), o ^{123}I é produzido por processos diretos, sendo que os principais utilizam prótons ou dêuterons induzindo reações nucleares em isótopos de telúrio enriquecido, na forma de óxidos ($^{124}TeO_2$, $^{123}TeO_2$ e $^{122}TeO_2$), com auxílio das reações $^{124}Te(p,2n)^{123}I$, $^{123}Te(p,n)^{123}I$ e $^{122}Te(d,n)^{123}I$, e é produzido com alta pureza (99,9%) por processos chamados de indiretos, aqueles que fazem uso de um sistema precursor $^{123}Xe \rightarrow ^{123}I$. O principal processo utiliza como alvo ^{124}Xe enriquecido em 99,8% e a produção é feita pela reação $^{124}Xe(p,2n)^{123}Cs \rightarrow ^{123}Xe \rightarrow ^{123}I$.

Quanto aos materiais utilizados na confecção dos sistemas de irradiação deve-se levar em consideração a boa condutividade térmica e sua não reatividade química com o alvo. A natureza química do produto radioativo e o método de separação são fatores decisivos na escolha do material de construção. Para as janelas, que separam o vácuo do cíclotron do alvo, devido às altas intensidades de corrente do feixe, são esperadas altas tensões, sendo utilizados materiais como Al, V, Ti, Ni, Cu, Nb, Havar, etc. Quanto ao porta-alvo, tem sido empregados materiais como Al, Ti, Ni, Cu, Pt, Ag, aço inoxidável, Inconel, etc.

2.2 AUTOMAÇÃO

A automação está cada vez mais presente nos sonhos do Homem, sendo perseguida pelos cientistas como a solução para melhorar nossa qualidade de vida, substituir os grandes esforços, a repetitividade dos movimentos mecânicos, os trabalhos perigosos e multiplicar exponencialmente a produção, para atender a demanda igualmente crescente da população mundial. A automação é uma tecnologia que pode ser aplicada nos mais diversos processos para gerar produtividade, agilidade, flexibilidade e bem-estar. Ela abre horizontes para que o ser humano multiplique seu potencial, desenvolva sua criatividade e dê início a uma nova era de realizações, onde certamente ele continuará sendo a Figura central, responsável pelas decisões. Cabe a ele encontrar o melhor caminho [28].

A estrutura básica da automação abrange a parte de campo, onde ficam os componentes de operação e detecção, e a parte de controle, que interagem entre si. Os componentes de operação são responsáveis pelas ações em um sistema e são representados pelos atuadores (por exemplo, cilindros pneumáticos), válvulas, etc. Estes componentes de operação reagem de acordo com os comandos de controle. Os componentes de detecção promovem o diálogo entre a operação e o controle, transmitindo para o controle as informações referentes à situação dos componentes na operação. Eles são definidos como sensores e podem ser mecânicos, pneumáticos, elétricos ou até ópticos. Os sensores monitoram corretamente a execução dos trabalhos na operação, transmitem essas informações para o controle, por meio de sinais que representam fenômenos físicos (movimento mecânico, presença ou não de peças, etc.). Isto mostra a importância da função detecção, que estabelece um diálogo entre os componentes de operação e o controle, informando a real posição das unidades de trabalho.

O Controle é a parte "pensante" do sistema, que fornece, por meio das informações da operação, os sinais de comando para as unidades de trabalho. Todo sistema necessita de controle para coletar as informações dos sensores, processá-las de acordo com objetivos preestabelecidos e emitir os sinais necessários, para que os componentes da operação executem o trabalho desejado [29,30]. O Controle também é a capacidade de aplicar automaticamente

algoritmos que ajustam os valores do processo e ainda mantém certos valores dentro dos seus limites especificados [31].

2.2.1 Interface Homem-Máquina [32]

O estudo das interfaces homem-máquina tem por objetivo geral estabelecer um bom nível de conversação entre o usuário de um sistema informatizado e este sistema, no sentido de unir a inventividade e a criatividade do homem na solução de problemas e a vigilância e capacidade de prognóstico da máquina para controlar, de forma segura e eficiente, um determinado processo.

Na história da evolução dos sistemas interativos, três forças impulsionaram o seu desenvolvimento:

- A primeira força é a econômica: aumentando-se o acesso dos operadores aos dados, uma empresa aumenta a produtividade e, com isso, seus lucros.

- A segunda grande força é a segurança. O homem tem um comportamento muito semelhante ao da máquina no que diz respeito ao ciclo de aquisição de uma informação, seu processamento e atuação sobre os equipamentos. Existe um certo seqüenciamento nas operações mentais e, portanto, um limite para o volume de informação oferecido simultaneamente, acima do qual o indivíduo começa a bloquear sua capacidade de discernimento e raciocínio, comprometendo a qualidade da operação. Neste caso, torna-se necessário falar em confiabilidade humana e levá-la em conta na confiabilidade total do sistema. A segurança de um processo não afeta unicamente as instalações e a vida do operador. Também, o meio ambiente e as populações vizinhas dependem da operação segura das indústrias em geral, das centrais nucleares, das estações de tratamento, etc.

- A terceira grande força é a experimentação, ou seja, o espírito científico que é despertado pelos assuntos complexos e interessantes, ligados aos mecanismos de percepção do homem e sua comunicação com a máquina. Da ação conjunta destas três forças, observa-se o crescente interesse dos fornecedores de sistemas de controle em melhorar a interface de operação.

No início da década de 50 os instrumentos eram grandes, conectados cada um a seu ponto de processo e colocados próximos deste ponto. O controle era bastante descentralizado, fazendo com que o operador só tivesse conhecimento de uma seção de uma unidade do processo.

Com o desenvolvimento da técnica de transmissão pneumática, o controle pode ser mais centralizado, agrupando-se mais instrumentos em um mesmo painel. Somente no final dos anos 50 houve a miniaturização do *hardware* de recepção, fazendo com que os antigos instrumentos, de tamanho médio 18x18 pol., reduzissem para padrões até 2x6 pol. Também, iniciava-se a instrumentação eletrônica a transistor, permitindo a transmissão eletrônica e a centralização da instrumentação no painel de controle.

No início da década de 60, os computadores digitais com seus periféricos de interface foram introduzidos na sala de controle, que passou a conter informações híbridas com a convivência do computador digital e da instrumentação de painel. Até muito recentemente esta era a situação normal de operação: operadores que manipulavam computadores digitais ainda tinham como respaldo o apoio da instrumentação analógica, utilizada principalmente em casos de acidente. Os inconvenientes para este tipo de operação são claros: o operador tem de aprender uma nova tecnologia e um diálogo com a máquina, sem poder perder a prática de manipulação dos instrumentos. Pior ainda, o diálogo mais confortável, o mantido com o computador, devia ser abandonado exatamente nas situações de emergência.

A grande revolução aconteceu com o emprego dos microprocessadores. A operação e detecção voltaram ao campo, enquanto que o controle centralizou-se nas salas de controle. Os microprocessadores tornaram o controle mais confiável, sendo possível abandonar de vez os instrumentos de painéis, facilitando a operação.

As salas de controle também sofreram modificações. O arranjo, destinado à convivência da instrumentação analógica e digital, cedeu lugar ao arranjo, onde apenas o computador faz a interface homem processo.

Em relação às interfaces homem-máquina no controle de qualquer processo, dois aspectos devem ser considerados:

- Ergonomia Física: que diz respeito às necessidades de ação sobre os equipamentos, aos deslocamentos do operador no ambiente de controle, ao seu relacionamento com os demais operadores.

- Ergonomia mental: que cuida dos mecanismos de percepção de eventos e das tarefas mentais do operador.

Os primeiros esforços no sentido de se aumentar a qualidade das interfaces homem-máquina foram em ergonomia física: as salas de controle são projetadas para reduzir o tráfego de pessoal, para não incomodar a operação. A utilização de monitores de vídeos em interfaces integradas, substituindo os painéis da instrumentação convencional, trouxe a vantagem de reduzir o esforço físico do operador, que não mais precisa deslocar-se para obter uma informação, podendo vê-la com o simples acionamento de uma tecla.

2.2.1.1 Interface Gráfica Interativa

A operação por meio da utilização de sistemas de operação centralizada se baseia em um conjunto de vistas do processo, mostradas como esquemas gráficos em telas de vídeo (supervisão) e em dispositivos de acionamento, que transferem à máquina a vontade do operador (controle). Este conjunto gráfico interativo é a *console* de operação (Painel de Controle) ou estação de trabalho (*workstation*), a partir da qual um operador sentado comanda o processo.

A *console* de operação, composta de forma mínima por um vídeo e um dispositivo de entrada (teclado, mouse), pode ainda estar equipada com impressoras, registradores gráficos, registradores de vozes, painéis de alarmes e outros dispositivos de apoio à operação. A comunicação entre a máquina e o homem é feita por intermédio de recursos visuais (telas) e sonoros (sinais de alarme). As telas são organizadas de forma hierárquica, possibilitando uma visão global que se refina até o detalhe de um instrumento. Outras telas são apresentadas de forma sinótica, com representação gráfica de símbolos que remetem o operador à planta controlada. Os alarmes sonoros servem para chamar a atenção do operador para alguma ocorrência no campo, uma vez que o processo de percepção humana é um processo voluntário, devendo ser despertado por algum estímulo exterior.

O diálogo do homem com a máquina se dá por meio de dispositivos de interação, que executam as funções lógicas de seleção, posicionamento, entrada de informações numéricas e textos e seleção de funções. São vários os equipamentos interativos utilizados.

2.2.1.2 Interface Homem-Máquina com Microprocessadores

Uma técnica bastante utilizada é a de microcomputadores como interface homem-máquina de sistemas controladores que têm, como interface máquina – processo, Controladores Lógicos Programáveis (CLPs).

O uso de microcomputadores na interface homem-máquina produz um recurso de múltiplas janelas muito interessante. Outra vantagem dos microcomputadores é a facilidade de utilização do vídeo, de fácil programação, tanto em modo gráfico como semigráfico. No entanto, um argumento forte é o grande volume de programas de base e aplicativos escritos para ele e também às placas especiais, que controlam praticamente todo o tipo de periféricos a um custo relativamente baixo, principalmente se descontarmos o desenvolvimento.

2.2.1.3 Configuração

A configuração é a tarefa de descrição do processo para os sistemas de controle. Esta descrição engloba a definição dos pontos de supervisão e controle; a atribuição dos pontos aos canais de entrada e saída do computador; a definição da estratégia de controle; a definição das seqüências lógicas; o desenho das vistas de operação do sistema; a escolha e o posicionamento dos elementos visualizáveis nas telas; a definição da periodicidade das malhas de controle e outros parâmetros do sistema. A configuração equivale, portanto, à programação do sistema de controle. Há inúmeras formas diferentes para a programação dos sistemas, da mesma forma como há inúmeras linguagens diferentes para a programação de computadores. Normalmente, para um processo, a configuração é dada pelas variáveis de controle, que são extraídas de diagramas, da forma mais conveniente para a entrada de informações. Isto resulta no processamento de um desenho, editado graficamente pela composição de elementos básicos como tanques, bombas, válvulas e elementos de ligação entre eles.

A linguagem de programação da maioria de CLPs (diagrama de relés) aproxima-se desta filosofia por ser igual à lógica convencional de programação. Linguagens de controle de processos incorporam comandos de linguagens de alto nível e blocos funcionais, descrevendo as seqüências do processo.

2.2.1.4 Sistema de Monitoração de Parâmetros de Segurança

O homem tem um limite máximo no número de operações mentais, acima do qual a mente sofre um tipo de bloqueio, como um computador sobrecarregado. Em situações de emergência é comum uma "avalanche" de alarmes, tornando-se, às vezes, difícil ao operador analisar todos eles e dar-lhes a devida prioridade. Um sistema de monitoração de variáveis críticas é fundamentalmente um sistema Supervisório. Ele é alimentado por dados coletados do processo, diretamente ou por meio de algum cálculo. A apresentação das informações é hierarquizada em telas. A primeira, mais global, é simplesmente uma representação, gráfica, bastante sintetizada, do estado de alarme de todas as unidades do sistema. Com o auxílio desta tela é possível observar qual unidade do sistema tem seu funcionamento mais fora dos padrões e dirigir para esta unidade as atenções de operação. A esta tela sucedem-se outras, com detalhamento progressivo da informação em alarme, até o ponto de se obter instruções quanto à solução do problema ocorrido.

2.3 REVISÃO DE LITERATURA

2.3.1 Alvos e Porta-alvos

Michael et al [33], em 1981, reportaram o desenvolvimento de um porta-alvo sólido, para a produção de ^{123}I, pela reação $^{124}Te(p,2n)^{123}I$, no cíclotron *CV-28* de *Jülich* (Alemanha). O alvo consistia de ^{124}Te, com enriquecimento maior que 99%, na forma de $^{124}TeO_2$, fundido em uma placa de Pt e fixo por sucção, em uma cavidade na parte móvel do porta-alvo. Em seguida, esta parte móvel era fechada, por intermédio de um pistão pneumático. A refrigeração com água era feita na parte anterior e posterior do alvo (geometria 4π). Uma janela de Havar separava o alvo do vácuo da linha de feixe. Após as irradiações, a refrigeração era desligada e o alvo era desprendido da parte móvel do porta-alvo pela quebra de vácuo, caindo em uma blindagem de Pb. Todas as manipulações no porta-alvo, exceto a colocação do alvo na cavidade, eram realizadas e controladas por sistemas de chaveamento a relés convencionais. O intervalo de energia incidente no alvo era de 22,4 a 20MeV. As irradiações foram feitas com feixes de 30μA durante 1hora. Os rendimentos obtidos variavam de 3700 a 4440MBq (100 a 120mCi) no *EOB* (End of Bombardment – fim do bombardeamento). Este sistema é similar ao adotado pelo *IPEN* [24], durante muitos anos para a produção do ^{123}I e foi utilizado no atual trabalho, na composição do sistema de irradiação para alvo sólido. Porém, foi adaptado para alvos de Zn eletrodepositados em placas de Cu niqueladas, para a produção de ^{67}Ga.

Shefer et al [34] em 1991, descreveram a produção de radionuclídeos usados em *PET*, desenvolvidos no acelerador linear *TANDEM (TCA)* da *Science Research Laboratories* (EUA). Neste trabalho, foram citadas as características mais marcantes do *TCA*, com uma comparação de custo/benefício de um cíclotron convencional para a produção de radioisótopos para *PET*. Em particular, descreveram especificamente um sistema de alvo cônico criogênico, para a irradiação de $H_2{}^{18}O$, em forma de gelo, para a produção de ^{18}F, sem nenhuma menção de automação do processo. Este tipo de alvo cônico foi a geometria de partida para o controle automatizado do alvo líquido no atual trabalho, pois ele possui características específicas, que requerem praticamente

o maior número de etapas experimentais que qualquer outro tipo poderia apresentar. O controle automatizado foi ampliado para a utilização de outros dois tipos de alvos (sólidos e gasosos), chegando-se ao sistema único de controle e não a um específico para cada radioisótopo produzido, como os existentes comercialmente.

Herscheid et al [35], em 1992, produziram o ^{81}Rb, pela reação $^{82}Kr(p,2n)^{81}Rb$, a partir de ^{82}Kr enriquecido a 99,92% e subsequente lavagem do alvo pela injeção de água. Foi desenvolvido um gerador compacto, usando uma membrana de troca iônica, que permitiu a carga e eluição com altas taxas e proporcionou maiores rendimentos de produção que aquelas normalmente usadas em coluna de gerador. Sua geometria compacta permitiu a redução da quantidade de Pb necessária para blindagem O nuclídeo de meia-vida curta, ^{81m}Kr ($t_{1/2}$=13,1s), filho do ^{81}Rb ($t_{1/2}$=4,58h), tem encontrado ampla aplicação em rotinas da Medicina Nuclear para estudos de ventilação pulmonar. Em virtude da dose absorvida ser baixa, é possível utilizar atividades maiores, para aquisição de imagens de alta densidade, em um tempo curto.

Firouzbakht et al [14], em 1993, estudaram os parâmetros de um porta-alvo cônico criogênico utilizado na produção de ^{18}F, a partir da irradiação de ^{18}O como alvo, na forma de CO_2 congelado. O intuito de tal estudo foi o de verificar o comprimento do cone (ângulo de abertura de 30^0) e o número de aletas de refrigeração na parte posterior do alvo (dentro da câmara criogênica) para otimizar o projeto do alvo. Isto se deve ao fato de que a quantidade necessária de material alvo e a corrente máxima de trabalho são dependentes de um projeto particular. Três tipos de porta-alvos foram usados: o primeiro, com um único bloco de resfriamento na parte posterior do alvo; o segundo, com várias aletas e um cone curto e o terceiro, também, com várias aletas e cone longo (como o primeiro), mais eficiente em termos de refrigeração. Em relação ao comprimento, os cones não mostraram diferença na volatilização do alvo, para correntes de 18μA. Este alvo criogênico mostrou eficiência maior que 99% na recuperação do material alvo e rendimento de produção similar ao obtido em alvos que utilizam água enriquecida (^{18}O) e correntes de 18μA.

Lepera et al [36], em 1997, descreveram um porta-alvo para irradiação de água enriquecida a 97,5% em ^{18}O, de alta pressão, para a produção de $[^{18}F]F^-$, com prótons de 18MeV. O alvo foi usinado de um pequeno bloco de cobre (OFHC – alta condutividade, livre de oxigênio), tendo 32mm de diâmetro e 25mm de comprimento. A cavidade do alvo correspondia a 4mm de profundidade, 13mm de largura na frente e 10mm de largura na parte traseira, o volume de água enriquecida (^{18}O) usado era de 0,5cm^3. Após a usinagem o porta-alvo foi niquelado. Os rendimentos de recuperação máximos previstos foram de 88% e puderam ser reproduzidos com uma incerteza de ±4%, para correntes de feixe de 25μA e tempos de irradiação de até 90min. Foram produzidos e fornecidos, rotineiramente, 37GBq (1Ci) de $[^{18}F]F^-$, em menos de 45min de irradiação para síntese de [^{18}F]FDG. Também foram discutidos os mecanismos de refrigeração e considerações do projeto para operações de alvos de alta pressão.

Fiser et al [37], em 1999, descreveram um projeto para a produção do ^{81}Rb e fabricação de geradores $^{81}Rb/^{81m}Kr$. O ^{81}Rb ($t_{1/2}$=4,58h) e seu filho ^{81m}Kr ($t_{1/2}$=13,3s) constituem um gerador de radionuclídeo para Medicina Nuclear, sendo usado como uma ferramenta comum em estudos de perfusão e/ou ventilação pulmonar. As principais vantagens deste gerador são as boas propriedades para gerar imagens do ^{81m}Kr (**E**=190,4keV) e a baixa dose de radiação em tecidos. Em virtude da meia-vida curta do pai ^{81}Rb, estes geradores geralmente são fabricados e distribuídos perto da área de aplicação. Um método típico de produção do ^{81}Rb é a irradiação de Kr gasoso pressurizado em um porta-alvo, utilizando-se um acelerador. O produto radioativo é aproveitado por lixiviação com água da câmara do alvo. O projeto do gerador de Rb/Kr utilizado em Medicina geralmente consiste de uma cápsula contendo um meio sólido poroso, carregado por um composto de Rb radioativo. Em um departamento de Medicina Nuclear, a cápsula é ligada a uma fonte de gás carregador em uma unidade blindada e o Kr radioativo é, então, eluído e administrado sob condições de fluxo controlado. A produção de ^{81}Rb foi feita utilizando-se feixe de prótons de 31MeV e corrente de 15μA. A câmara de irradiação, com volume de 23,6mL, possuía 200mm de diâmetro e 75mm de comprimento e era feita de alumínio. A janela do porta-alvo era de Al, com 400μm de espessura. O material alvo consistia de gás ^{nat}Kr, com uma densidade superficial de 530mg/cm^2, correspondendo a uma perda de energia do feixe de prótons de aproximadamente

7MeV no alvo. A pressão inicial era de 2,0MPa e aumentava até 3,5MPa, durante a irradiação. Os isótopos de Rb produzidos no alvo eram dissolvidos em água contendo Rb como carregador. A solução radioativa era transportada por um sistema capilar até uma *hot cell.* Utilizando este sistema, 18GBq (486mCi) de ^{81}Rb puderam ser obtidos no final de uma irradiação de 5h. Usando alvo enriquecido em ^{82}Kr, a atividade pôde ser aumentada até 140GBq (3,78Ci) de ^{81}Rb.

Firouzbakht et al [38], em 1999, descreveram métodos de produção de ^{13}N-Amônia, no cíclotron do *BNL 60", New York* (EUA), pela reação $^{16}O(p,\alpha)^{13}N$, utilizando um porta-alvo cônico criogênico, confeccionado em prata, possuindo aletas para melhorar a refrigeração. O diâmetro de entrada era de 2,5cm, comprimento de 5cm e ângulo de 15°. Os alvos empregados foram dióxido de carbono (CO_2) congelado e água (H_2O) pura congelada. Particularmente, este tipo de projeto (alvo cônico criogênico) é importante em aceleradores de baixa energia e alta corrente de feixe, pois pode ser usada uma janela muito fina ou nenhuma janela de isolação de vácuo. A pressão do alvo foi monitorada durante a irradiação, para garantir que o material do alvo não fosse volatilizado e verificou-se que não ocorreu nenhuma perda. No caso da água pura congelada, o volume utilizado variou de 2 a 10mL. A corrente de feixe média utilizada foi de 10μA e a máxima de 20μA. A energia incidente do feixe era de 18MeV. Uma enorme diferença foi encontrada entre a água no estado congelado, quando comparada com alvos de água no estado líquido. Quando a água estava congelada, mais de 95% da atividade de ^{13}N estava na forma química de amônia, para todas as doses investigadas. No caso do CO_2 congelado, mais de 95% da atividade de ^{13}N estava na forma de nitrato e nitrito.

Berridge et al [39], em 1999, relataram a construção de vários porta-alvos, para a produção de ^{18}F, por intermédio da irradiação de $H_2{}^{18}O$ (0,5 a 1,2mL), usando projetos com folha dupla e espaçadores de prata. O porta-alvo final se mostrou normal em cíclotrons de modelo *Scanditronix MC-17* e foi usado para a produção de ^{18}F por muitos anos. Estes porta-alvos foram projetados para operar neste tipo de cíclotron, que não é equipado com óptica de feixe externo, sendo montados diretamente na porta de saída da câmara de vácuo por onde passa o feixe. O cíclotron produz prótons com energia nominal de 17MeV, com um perfil

de feixe largo. Os porta-alvos descritos aqui foram projetados com dois objetivos: o primeiro, era substituir rapidamente o porta-alvo de cobre niquelado fornecido pelo fabricante, que mostrou um rápido desgaste, adicionando impurezas de cobre, o que poderia prejudicar as marcações e o segundo, era conservar e economizar o alvo de $H_2{}^{18}O$, que estava em falta. A demanda diária de ^{18}F era de aproximadamente 11,1GBq (300mCi). Mudanças posteriores nos projetos dos porta-alvos foram necessárias, em virtude do aumento da demanda, o projeto de alvo final usava apenas 0,7-0,8mL de $H_2{}^{18}O$ e atingia o máximo de 50GBq (1,3Ci) 1GBq de ^{18}F, embora o normal fosse produzir de 25,9 a 29,6GBq (0,7 a 0,8Ci), em irradiações de 45min com correntes de feixe de 15μA. Projetos futuros levarão em consideração a menor importância de conservação de água e as lições de operação e manutenção aprendidas com estes porta-alvos.

O'Neil et al [40], em 1999, descreveram as modificações feitas em um porta-alvo do tipo "catraca de revólver". Este tipo de sistema (pela rotação em torno de um eixo central) é um dispositivo que faz uso de uma saída de feixe fixa, com colimador de 8mm, no cíclotron RD112 da CTI. Uma única fonte de água de refrigeração circulava em volta dos oito porta-alvos. A refrigeração da janela era fornecida por hélio, que era dirigido em jatos contra ambas janelas, de isolação do alvo (folha de Havar de 25μm de espessura) e de isolação de vácuo (folha de alumínio de 25μm de espessura). Cada porta-alvo compacto possuía 100mm de comprimento e 30mm de diâmetro. O $^{18}O_2$ (enriquecido isotopicamente com mais de 97%) era introduzido no porta-alvo, a uma pressão de 1,38MPa (200psi), utilizando uma garrafa de SS (*cryo-trap*) de 75mL. O alvo foi submetido à irradiação com prótons (10MeV por meio das duas folhas), com tempos de 40 a 60min de duração, e correntes de feixe entre de 20 e 40μA. No término da irradiação, o alvo de $^{18}O_2$ era recuperado em uma garrafa de SS, imersa em um *Dewar* preenchido com nitrogênio líquido, por método criogênico, deixando o produto da reação $^{18}O(p,n)^{18}F$ preso nas paredes de alumínio do porta-alvo. Tipicamente, a transferência criogênica de $^{18}O_2$ era tal que mais de 20 operações puderam ser feitas sem adição de isótopo na garrafa de alimentação. O isótopo $^{18}F_2$ era desprendido das paredes do porta-alvo por uma reação de troca, com quantidades micromolares de ^{19}F gasoso (em alta pressão).

Firouzbakht et al [41], em 1999, determinaram a possibilidade da produção direta de [^{11}C]HCN em um alvo criogênico de prata e investigaram os produtos da irradiação de amônia sólida (congelada), com altas correntes de feixe de prótons, por intermédio da reação $^{14}N(p,\alpha)^{11}C$, no *Brookhaven National Laboratory* (EUA). Eles verificaram ser possível evitar a decomposição radiolítica de [^{11}C]HCN mantendo-se a matriz de amônia congelada.

Hess et al [42], em 1999, estudaram algumas otimizações na produção de [^{18}F]F_2, pela reação $^{18}O(p,n)^{18}F$, no cíclotron *CV-28* de *Jülich* (Alemanha). Um método muito comum tem sido usado para a produção do ^{18}F, por meio da reação com alvo gasoso $^{20}Ne(d,\alpha)^{18}F$. Recentemente a reação $^{18}O(p,n)^{18}F$ tem ganho muita atenção, prometendo a obtenção de altos rendimentos, com energias entre 10 e 20MeV. Assim, necessita-se somente de um acelerador de prótons. O porta-alvo era cônico, tendo uma janela esférica na entrada e confeccionado em Al, com volume total de 30mL e as conexões de preenchimento do gás e de vácuo foram soldadas junto com o porta-alvo. As irradiações foram realizadas com feixes de 20μA por 2horas, com oxigênio enriquecido em ^{18}O a 97%, produzindo aproximadamente 37GBq (1Ci) no *EOB*. Este sistema de alvo tem sido usado na produção rotineira de [^{18}F]F_2 sem qualquer problema, por mais de 50 irradiações.

Ruth et al [43], em 1999, reportaram as características de um porta-alvo para a produção de alta quantidade de $^{18}F_2$. Segundo os autores, teoricamente é possível produzir mais que 10Ci de $^{18}F_2$, pelo bombardeamento de ^{18}O, utilizando-se alvo gasoso, com feixe de prótons de 100μA por 3horas e energia de 18MeV. Para confecção de um porta-alvo devem ser levados em consideração os seguintes parâmetros: resistência mecânica e refrigeração da janela para operação com 100μA ou mais; relação da pressão do alvo com o tamanho da câmara de refrigeração; redução da densidade; espalhamento e resistência da janela; recuperação do gás ^{18}O-O_2 para reciclar o material alvo enriquecido; material do porta-alvo compatível com a lavagem do alvo, para obter um alto fator de recuperação e solução para recuperação do $^{18}F_2$ para manter a reatividade química e a compatibilidade de reutilização do alvo.

Hess et al [44], em 2000, apresentaram o projeto, modificações e utilização de um porta-alvo, com câmara em forma cônica, com raios frontal e traseiro de 8 e 10mm, respectivamente, e um comprimento de 122mm. As dimensões correspondem ao formato do feixe, que foi calculado pela simulação de Monte Carlo. Neste modo, quaisquer interações entre o feixe e a parede são evitadas e todo o feixe é utilizado para a reação nuclear. O volume resultante do alvo, incluindo toda a tubulação, era de 30mL. Uma janela hemisférica de 500μm de espessura foi usada na entrada, em vez das janelas duplas comuns. A janela era parte integrante da câmara do alvo, portanto não foi necessário utilizar nenhuma vedação como *o-ring*. A forma cônica é uma solução otimizada, para resistir às forças causadas pela alta pressão durante a irradiação. Também, a transferência de calor é mais eficiente. A câmara do alvo, a janela e as tubulações foram feitas de uma liga de alumínio contendo 3% de magnésio ($AlMg_3$). O porta-alvo modificado consistia de duas partes, soldadas. As tubulações conectadas para fazer vácuo e preenchimento com gás foram soldadas no corpo do porta-alvo. Assim, a conexão de todas as partes do porta-alvo, permaneciam em contato com o gás durante a irradiação e era feita sem nenhum *o-ring*. A câmara do alvo era refrigerada com água a 20°C e a janela refrigerada separadamente, com água a 6°C. Todas as irradiações foram realizadas no ciclotron compacto *CV-28* de *Jülich* (Alemanha), usando um feixe de prótons focalizado de 16MeV. Utilizando-se alvo gasoso enriquecido em ^{18}O (97%), em irradiações de 120min e corrente de feixe de 20μA, foram produzidos até 34GBq (919mCi) de $[^{18}F]F_2$ e atividades específicas de 350 a 600GBq/mmol (9,46 a 16,22Ci/mmol), ambos medidos 30min após o fim do bombardeamento.

Helmeke et al [45], em 2001, relataram a produção de $^{18}F^-$, pela reação $^{18}O(p,n)^{18}F$ com água enriquecida em ^{18}O. Ainda mencionaram que a produção deste radioisótopo é bem estabelecida no mundo inteiro, mas a transferência de calor ainda é um ponto crítico, quando altas correntes de feixe são usadas para aumentar a atividade produzida em um intervalo de tempo razoável de irradiação. Portanto, implantaram um sistema de varredura do feixe, com até 3cm no plano horizontal (monitorado por uma TV), que permitiu utilizar correntes de 30μA por 1hora, em irradiações feitas diariamente, extendendo o período de manutenção para mais de seis meses. A câmara do alvo foi confeccionada em Ti, em formato oval, com volume de 2,06mL. A janela do alvo

também era feita de Ti (0,05mm de espessura). O cíclotron *Scanditronix*, de *Hannover* (Alemanha), fornecia feixes de prótons de 17MeV de energia.

2.3.2 Sistema de Automação

2.3.2.1 Automação Geral

A automação vem desempenhando um papel, cada vez mais marcante no controle de processos em geral.

Clements-Jewery et al [46], em 1996, descreveram os Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) como a principal ferramenta para o controle de equipamentos em uma variedade de indústrias, desde que foram introduzidos, em 1969. Eles têm se desenvolvido extensivamente, tanto em *Hardware* como em *Software* e se tornaram mais baratos, menores, mais confiáveis e muito mais capazes que seus predecessores. Os CLPs têm sido usados em quase todas as indústrias, incluindo processamento químico, usinas de energia, indústrias automotivas, de computadores, aeroespaciais, na agricultura, etc., em testes e fabricação. Esta popularidade tem sido, em grande parte, em virtude dos avanços na tecnologia da computação. Estes avanços têm permitido o uso de algoritmos cada vez mais sofisticados e têm fornecido capacidade para controlar operações de alta velocidade. Assim, os CLPs têm sido usados em um espectro amplo de aplicações.

Rullán et al [47], em 1997, compararam os CLPs com os Computadores Pessoais (PCs) para utilização em controle de processos. Os CLPs foram projetados para substituir os painéis de controle com relés. Os painéis de controle com relés podem ter um alto custo para sistemas complexos, são de difícil reconfiguração e manutenção, provocam um consumo alto de energia, têm velocidade de operação moderada e possuem uma baixa confiabilidade. Atualmente, estes tipos de painéis não são mais alternativas confiáveis para uma aplicação industrial complexa, onde a flexibilidade, a facilidade de manutenção e resolução de problemas são muito importantes. Os circuitos de controle de painéis que utilizam relés são geralmente desenhados usando-se os chamados

diagramas elétricos *ladder*. Eles diferem levemente de diagramas de fiações elétricas convencionais, já que não mostram o arranjo físico dos componentes, mas enfatizam a função de cada circuito em um diagrama de contato. Eles consistem de uma série de circuitos paralelos que, em essência, representam um programa que controla a seqüência de operação em um dado processo. Sendo circuitos elétricos em paralelo, fornecem a vantagem de resolver todo o controle lógico simultaneamente e praticamente instantaneamente.

Os CLPs superam todas as falhas de painéis de relés e atualmente são amplamente utilizados como controladores em automação industrial. Na época que eles foram introduzidos, foram recebidos com muito sucesso, pois faziam uso da linguagem *ladder,* muito usada nos diagramas elétricos, com os quais Engenheiros e Eletricistas estavam familiarizados.

Por outro lado, uma outra tecnologia que pode ser usada é a dos PCs, porém existem desvantagens de seu uso quando comparados aos CLPs. Os PCs comerciais não são projetados, normalmente, para suportar choque, vibração, temperatura e ruído elétrico, freqüentemente encontrados em uma fábrica. Ainda que o *Hardware,* que reune estas condições ambientais, seja facilmente disponível para CLPs e PCs, isto pode aumentar o custo de implantação do controle baseado em PC. Os PCs podem não ser eficazes em termos de custos, para aplicações com poucos pontos de entrada/saída (I/O), o que ocorre em 90% do mercado, mas são vistos como soluções para sistemas mais complexos, com muitos pontos de I/O e estratégias complexas de controle. A interface de I/O baseada em PC pode ser um tanto cara e mais difícil para implantar que para CLPs. Estes últimos são mais rápidos para reiniciar, do ponto em que foram desligados, após uma falta de energia e têm melhor habilidade para reter dados.

Sonnleitner [48], em 1997, ressaltou a importância da automação em processamentos biológicos sob diversos pontos de vista: em aspectos científicos, práticos e rotineiros. Um processo biológico automatizado é conveniente e prático, evita aborrecimentos e as tarefas rotineiras podem ser mais eficientemente e convenientemente manuseadas por máquinas. Portanto, o pessoal envolvido pode ser deslocado para realizar outras tarefas. A automação também permite realizar trabalhos 24 horas por dia, sete dias por semana. Estas

razões são suficientes para implementar algum tipo de automação na indústria, a fim de melhorar e garantir constância nos padrões de qualidade, com altos níveis de precisão. Além disso, a automação também aumenta a reprodutibilidade de processos de produção rotineiros, sendo uma ferramenta mais eficaz para pesquisas fisiológicas de causas analíticas, verificação de modelos de processos e desenvolvimento de processos biológicos.

Gaehle et al [49], em 1997, desenvolveram um sistema para a operação remota do *Tandem Cascade Accelerator (TCA)*, para a produção de radiofármacos marcados com ^{15}O. Foi utilizada uma rede de controle do *TCA*, com conexões por telefone via *modem*. A nova rede de *modem* foi estabelecida em seis computadores e permitiu controlar e/ou monitorar o *TCA*, além de acompanhar os sistemas de produção de radiofármacos de qualquer um dos seis satélites.

Sasaki et al [50], em 1998, descreveram a situação dos sistemas de automação em laboratórios clínicos no Japão, que se iniciou em 1981. No caso dos autores, eles começaram a desenvolver um sistema de laboratório completamente automatizado, em virtude da falta de mão-de-obra especializada. Aproximadamente 72% dos hospitais universitários no Japão instalaram sistemas comerciais. Havia uma tendência em hospitais com número suficiente de técnicos, de introduzir sistemas completamente automatizados em seus laboratórios, bem como em hospitais pequenos, com menos de cem leitos, estavam planejando introduzir tais sistemas, contudo a tecnologia corrente era muito cara e não estava suficientemente padronizada para reunir as necessidades destes segmentos de mercado no Japão.

Felder et al [51], em 1998, comentaram que a automação de laboratórios estava começando a se tornar uma ferramenta indispensável de sobrevivência, em virtude da difícil competição no mercado. Assim, vendedores de automação estavam desenvolvendo configurações de *Hardware* alternativas chamadas de "automação modular", para se ajustar a laboratórios menores. De acordo com os autores, a automação e a robótica seriam uma ferramenta chave de sobrevivência.

COMISSAO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP IPEN

Du et al [52], em 1999, apresentaram um modelo de mensagem orientada para o controle de um supervisório em sistemas de fabricação. O controle do supervisório para sistemas de fabricação envolve atividades, tais como, execução de interface com o operador, aquisição de dados, monitoração de processos e algum nível de controle de produção por meio do uso de computadores. As funções de um controle de supervisório podem ser resumidas em: Monitoração, para coletar informação das etapas do processo; Estimativa ou Prognóstico porque normalmente, nem todas as etapas do sistema e parâmetros do sistema são explicitamente observáveis; Controle ou Manipulação - baseado nos objetivos da produção, observação e estimativa do processo.

Shen et al [53], em 1999, apresentaram um sistema supervisório em tempo real, para processos de implantação de íons. O objetivo deste trabalho foi desenvolver um sistema supervisório que não monitorasse somente o processo de implantação de íon, mas também soubesse direcionar o operador sobre ações apropriadas, para manter a operação em uma ocorrência eventual de falha.

Hichwa et al [54], em 1999, analisaram a automação para a produção de radiofármacos. De acordo com os autores, os sensores e os transdutores têm sido desenvolvidos continuamente para medir diversas variáveis, tais como, radioatividade, pressão, condutividade, pH etc. Estes dispositivos funcionam com materiais muito corrosivos em tempo real, com amostras relativamente pequenas e em ambientes altamente radioativos. Tradicionalmente, o tempo é empregado na seqüência de passos para o controle dos processos, mas a realimentação de sensores está sendo usada não somente para monitorar e gravar informações, mas também influir no resultado do processo. Uma unidade de síntese de radiofármacos ideal deve operar sozinha, fazer a autolimpeza após a operação, registrar e documentar o processo completo, alertar o operador na ocorrência de falhas, preparar para futuras sínteses e fornecer análise estatística e possíveis procedimentos de manutenção. Estes sistemas podem ser divididos em categorias nas quais os processos funcionam em intervalos de tempo fixos ou variados, baseados nos dados de realimentação. No primeiro caso, não há um sensor para informação, sendo o processo impossível de ser mudado. No segundo, os sensores registram a informação, mas eles não controlam o processo. O terceiro caso retrata o uso de sensores de realimentação,

monitorando o processo de controle e alterando a duração da seqüência, baseado nas informações dos sensores. Neste último caso, a realimentação dos sensores administra a duração do processo, mas um sistema de inteligência ou informação processada proporciona um controle do processo baseado em tendências e comparações de parâmetros qualitativos, no lugar de níveis absolutos ou *set points*. Esta é a situação ideal em termos de síntese de radiofármacos.

Lin et al [55], em 2000, concluíram que em uma economia global competitiva, a automação tem sido uma aproximação importante na melhora da produtividade, qualidade e satisfação do cliente. Eles consideraram que, o sistema técnico de uma organização consiste das ferramentas, técnicas, dispositivos, artefatos, métodos, configurações, procedimentos e conhecimento especial usado pelos membros da organização, para adquirir entradas e transformar entradas em saídas.

Gillespie et al [56], em 2000, mostraram avanços recentes em *Software* no projeto de linhas de feixe, operações de aceleradores e treinamento de pessoal. Os aceleradores têm sido utilizados em Pesquisa, Indústria, Medicina, bem como em outros campos, e há uma necessidade crescente de novas ferramentas para melhorar a produtividade de cientistas e engenheiros envolvidos com estas aplicações emergentes de aceleradores. Diversos avanços em *Software* para computadores têm sido feitos para focalizar estas necessidades.

2.3.2.2 Automação em Alvos

Clark [10], em 1987, fez uma análise geral da aplicação da automação em tecnologias de alvos, mostrando algumas etapas do processo de controle automático. Na época, já enfatizava que um sistema inteiramente automático necessitava de um retorno de informação de sensores e transdutores, ligados a uma unidade de controle do processo. Porém, não mostrou nenhum sistema completo, dando apenas uma idéia de vários dispositivos de automação. Alguns destes dispositivos são encontrados comercialmente ou são desenvolvidos por grupos de pesquisa, que os utilizam em seus próprios sistemas. Ele ilustrou

alguns componentes, a saber, o CLP, para fornecer e controlar informações seqüenciais das etapas do processo, como a monitoração de controle de temperatura e pressão ou operações mecânicas. Foram citadas, também, válvulas com pequeno "volume morto" ou operadas remotamente, frisando a automação dos processos de síntese química do ^{18}F e ^{11}C.

Padgett et al [12], em 1987, do *CTI Cyclotron Systems Incorporation*, de *Berkeley* (EUA), descreveram sistemas automáticos de controle do cíclotron de íons negativos *RDS 11MeV*, alvos e sistemas químicos de processamento, apenas para a produção de ^{18}F, a partir do bombardeamento de água enriquecida em ^{18}O, permitindo operação rotineira e manual. O programa foi escrito em linguagem *Fortran 286*, que interpretava os comandos do usuário e realizava o controle de *Hardware*. O controle realizava duas funções: a) leitura de limites e chaves de posição, temperaturas, pressões, voltagens, correntes, fluxos de gases, etc.; b) transferência de comandos liga/desliga para válvulas, chaves e motores. Nesta descrição, não citaram as dificuldades e as limitações para sua utilização com outros radioisótopos de *PET*.

Erdman [11], em 1991, descreveu o sistema de controle desenvolvido pela *EBCO Technologies Inc.* (Canadá), que fez uso do controle de processo baseado no sistema industrial fabricado pela *Allen Bradley* (EUA). Neste sistema de controle de alvo e no sistema de síntese química, as interfaces do usuário eram implementadas por meio de um *Software* "control-view" (*Allen Bradley*), operado por um microcomputador, onde toda a operação era supervisionada. Estes sistemas contavam com uma saída para uma impressora, onde todos os dados relevantes estavam disponíveis para o usuário. Eles foram desenvolvidos para os radioisótopos utilizados em *PET*, tais como: ^{18}F, ^{13}N, ^{15}O e ^{11}C e eram fornecidos comercialmente. O trabalho não mostrou de maneira clara quais os parâmetros que eram controlados no processo ou quais os tipos de realimentação que foram utilizados.

Zeislers et al [13], em 1993, apresentaram três sensores especialmente projetados para uso na automação da síntese de ^{18}FDG. Descreveram o sistema de irradiação, que consistia de um porta-alvo de alta pressão e pequeno volume. A síntese química do ^{18}FDG era feita utilizando-se estes detectores e

transdutores, que forneciam um sinal conveniente para uma unidade de controle para monitorar a câmara do alvo, aprisionamento e eluição do $^{18}F^-$, por meio da coluna de troca iônica e, também, na determinação do fim da evaporação dos solventes nos reatores químicos do módulo de processamento.

Singlachar et al [57], em 1997, relataram que o *Australian National Medical Cyclotron* (*NMC*), em *Sydney* (Austrália), iniciou a produção rotineira de radioisótopos utilizados em *PET* e *SPET*, em 1992, usando o cíclotron de íon H^-, modelo *Cyclone 30*, fabricado pela *IBA* (*Ion Beam Applications* - Bélgica). Desde então, a produção de radioisótopos aumentou diversas vezes e o *NMC* fornece a totalidade dos pedidos de isótopos de *SPET*, ^{201}Tl, ^{67}Ga e ^{123}I, e, ainda, os de *PET*, ^{18}F (FDG), ^{13}N (Amônia) e ^{15}O (Água), para toda a comunidade australiana de Medicina Nuclear. Eles consideram que um sistema de aquisição de dados e controle supervisório conveniente (*SCADA - Supervisory Control and Data Acquisition System*) seria necessário, para a operação eficiente em instalações de produção de radioisótopos em cíclotron.

Sistemas avançados de controle e de aquisição de dados têm sido desenvolvidos para grandes aceleradores de partículas, baseados em várias plataformas de operação. O sistema de controle do *Cyclone 30* era baseado em dois CLPs *U135*, da *Siemens*. Uma interface com o operador foi fornecida originalmente, com o sistema de controle baseado em um pacote de comunicação *COM 527*, também da *Siemens*. Ele possuía diversas limitações, a saber, ambiente inseguro, falta de dados de registro, controle remoto e monitoração das instalações. Pelo uso do pacote *FIX DMACS* (*Intellution's Fully Integrated Control System Distributed Manufacturing Automation and Control Software*) *SCADA*, a interface homem-máquina deste cíclotron foi melhorada, com o desenvolvimento de uma interface gráfica eficaz para o usuário (*GUI - Graphical User Interface*) e, portanto, garantindo uma comunicação com ele. Vinte diferentes telas foram projetadas para visualizar e controlar os parâmetros do cíclotron, das linhas de feixe e dos dispositivos de irradiação. Um feixe de prótons contínuo e ininterrupto é um parâmetro importante na produção de radioisótopos de um cíclotron comercial. Qualquer queda de feixe durante a irradiação irá provocar uma redução significativa nos rendimentos de produção dos radioisótopos. Por

causa das meias-vidas relativamente curtas do ^{201}Tl ($t_{1/2}$=73,1h) e do ^{67}Ga ($t_{1/2}$=78,3h) produzidos no *NMC*, seus rendimentos de produção estão diretamente relacionados à qualidade e estabilidade do feixe de prótons. Utilizando-se o sistema original *COM 527,* se ocorresse uma interrupção do feixe de prótons, em uma produção rotineira noturna, o operador era automaticamente chamado pelo telefone celular. Porém, ele não tinha nenhuma indicação da natureza da falha durante a chamada, havendo a necessidade de dirigir-se até a sala de controle do cíclotron, para ter acesso aos comandos para ajustes e falhas. Com o sistema *FIX DMACS SCADA*, quando o operador recebe uma chamada em seu telefone celular, ele pode discar para um ambiente altamente seguro do sistema de controle e acessar as funções do controle do cíclotron, verificar as falhas e efetuar mudanças nos parâmetros de controle do feixe e, desta maneira, corrigir as falhas. Atendendo às falhas imediatamente após sua ocorrência, o operador pode reduzir significativamente o tempo de queda do feixe. Assim, os rendimentos de produção podem ser bastante melhorados. Além da queda do feixe por causa de falhas diversas, pode haver também uma lenta deterioração da intensidade do feixe de prótons durante uma operação noturna, em virtude de razões como a degradação das folhas do *stripper* ou flutuações de vácuo, que são inerentes a cíclotrons de íons negativos. O operador pode ligar para o *NMC SCADA* e fazer mudanças nos parâmetros de seleção do feixe, corrigindo variações da corrente do feixe de prótons e melhorando muito o rendimento de produção do radioisótopo. Esta função torna as operações do cíclotron mais eficientes e convenientes.

O *NMC SCADA* tem um sistema sofisticado de geração, visualização e registro de alarmes e vários sistemas de mensagens. Os alarmes são mostrados e registrados no disco para referências futuras. O operador pode acessar os alarmes, que são registrados no disco e o histórico de alarmes também pode ser impresso.

Shefer et al [58], em 1997, desenvolveram um sistema automatizado para controle de alvos sólidos e de processamento radioquímico para a produção de radioisótopos de meia-vida intermediária. O porta-alvo utilizava um cilindro de ar atuado remotamente para colocar o alvo na posição de irradiação. Durante a irradiação, a refrigeração era feita por água corrente, em contato direto com a

superfície traseira do porta-alvo. Após a irradiação, o alvo era retirado por controle remoto e transportado por uma linha pneumática para a *hot cell*. Este sistema automatizado foi experimentado na *Washington University School of Medicine* (EUA), para a produção de ^{64}Cu, além de outros radioisótopos de meia-vida intermediária, como: ^{66}Ga, ^{76}Br, ^{77}Br, ^{86}Y, ^{94m}Tc e ^{124}I.

Davenport et al [59] , em 1997, descreveram uma técnica simples para a produção de [1-^{11}C]Acetato, que é um importante radiofármaco utilizado em *PET*, para estudo do metabolismo do oxigênio no miocárdio humano. O ^{11}C era produzido pela reação $^{14}N(p,\alpha)^{11}C$, no cíclotron *Scanditronix MC40*, com feixe de prótons de 30μA e 19MeV, durante 1min. Um CLP, produzido pela *Siemens AG*, foi usado para chavear válvulas para capturar, prender e liberar o [^{11}C]Dióxido de Carbono inicial e para todas as operações de chaveamento subseqüentes. O procedimento de síntese foi facilitado pela automação com o CLP, já que somente a transferência de fluídos foi controlada, evitando-se a necessidade de realizar extrações difíceis e longas, além de destilações ineficientes.

Hammond et al [60], em 1997, projetaram e operaram um porta-alvo gasoso para irradiação de ^{82}Kr e produção de ^{81}Rb, no cíclotron *MRC*, de Londres, para preparação de geradores de ^{81m}Kr. Este último tem sido fornecido, desde 1975, para diversos departamentos de Medicina Nuclear da Inglaterra e utilizado em diagnósticos de ventilação pulmonar. Um porta-alvo com uma janela de 25mm de espessura e um volume interno de 190mL foi pesquisado inicialmente. A energia e a corrente do feixe de prótons foram otimizadas, irradiando-se gás ^{nat}Kr. Nos experimentos com gás ^{82}Kr (enriquecimento > 90%), foram empregados 30MeV (degradada até 27MeV em folha dupla de Alumínio) de energia e 30μA de corrente de feixe de prótons. Uma seqüência automática foi desenvolvida utilizando-se um CLP, para carregamento e descarregamento do alvo. Com exceção do alvo, todos os dispositivos utilizados para controle foram montados sobre um *rack* móvel, para permitir a sua remoção, detecção de falhas e/ou manutenção. O controle era realizado por um CLP, montado do lado de fora da caverna, com uma tomada para teste.

Medema et al [61], em 1997, realizaram um método de produção de [^{18}F]FDG completamente automático, sem acompanhamento de pessoal, com

uma grande confiabilidade e reprodutibilidade. O 2-[^{18}F]FDG é o traçador de *PET* mais utilizado para uso clínico, além de estar sendo distribuído também para hospitais com instalações de *SPET*. Como era ideal que ele estivesse disponível às 8h da manhã, a produção tinha que ser feita durante a noite. Portanto, foi necessário desenvolver esta automação. O processo foi dividido em duas partes: a) O cíclotron e o sistema de alvo eram controlados por um CLP da *Siemens*, modelo *135U*, que operava com o programa *STEP 5*; b) A síntese era controlada por um CLP da *B&R*, modelo *Midi-control*, com 16 entradas analógicas, 8 saídas analógicas, 24 entradas digitais e 48 saídas digitais. O porta-alvo utilizado foi confeccionado em Al e Ag, com volume interno de 1mL. A janela frontal (que separa o porta-alvo do vácuo do cíclotron) era de Havar (25μm) e a traseira, de Ag (250μm). As irradiações foram feitas no cíclotron *Scanditronix MC-17* (Holanda), com feixes de prótons de 17MeV e eram programadas até que a corrente integrada ou um tempo pré selecionado fosse alcançado. O rendimento típico era de 800mCi de $^{18}F^-$ em irradiações com correntes de 18μA durante uma hora.

Blessing et al [62], em 1997, desenvolveram um sistema de irradiação compacto, controlado remotamente, de fácil manuseio e recuperação do alvo gasoso, além de isolamento do produto radioativo, o ^{82m}Rb ($t_{1/2}$=6,5h). Este radioisótopo é utilizado em estudos do fluxo sangüíneo no miocárdio. Foi utilizada a reação ^{82}Kr(p,n)^{82m}Rb, com gás Kr enriquecido em ^{82}Kr a 90%. As irradiações foram feitas nos cíclotrons de *Debrecen*, modelo *MGC 20 E* (Hungria) e de *Jülich*, modelo *CV-28* (Alemanha), com feixes de prótons de 14,8MeV de energia e correntes de 1 a 10μA, por 1 a 2 horas. A câmara do alvo foi confeccionada em forma cônica, com Ni de alta pureza (para minimizar a corrosão durante o processo de vaporização), com volume de 51,8mL, incluindo o volume morto. O porta-alvo era refrigerado com água, na parte traseira e laterais e com gás He, na parte frontal, composta por duas folhas de Ni (30μm cada), que separava o porta-alvo do vácuo do cíclotron. Este sistema de alvo é muito versátil, pois pode ser empregado também na produção de outros radionuclídeos importantes na Medicina Nuclear, como o gerador ^{81}Rb-^{81m}Kr, ^{83}Sr, etc. Os autores não citaram qual o tipo de dispositivo utilizado neste sistema compacto controlado remotamente. O sistema de alvo gasoso desenvolvido no atual trabalho foi baseado nesta literatura.

Suzuki et al [63], em 1998, desenvolveram um sistema automatizado, para sintetizar rapidamente compostos marcados com ^{13}N, de alta atividade específica, usando $[^{13}N]NH_3$ anidro como um precursor sintético. A meia-vida curta deste radioisótopo ($t_{1/2}$=10min) causa dificuldades na síntese e em sua aplicação clínica, portanto é necessário utilizar métodos mais confiáveis. Para produzir o ^{13}N, pela reação $^{16}O(p,\alpha)^{13}N$, uma solução contendo O_2 puro foi utilizada como alvo e o carregamento da câmara foi feito com uma válvula de 6 vias, empregando-se uma seringa. As irradiações foram realizadas no cíclotron *NIRS HM-18*, de Tokio (Japão), com correntes de feixe de prótons de 17μA e 18MeV de energia (15,7MeV no alvo), por 25min.

Hara et al [64], em 1999, construíram um aparato de síntese de $[^{11}C]$Choline, controlado por computador, que fazia todo o processo de síntese e purificação do produto automaticamente. Isto foi feito, em virtude da meia-vida curta do ^{11}C ($t_{1/2}$=20min), que seria utilizado na realização de exames de diagnóstico por imagem. Como a aquisição de dados é feita em um pequeno intervalo de tempo e havia necessidade de realizar várias sínteses durante o dia, isto somente era possível utilizando-se um sistema automático. Isto é importante, pois se a atividade produzida é perdida (meia-vida de apenas 20 min) ela pode ser reposta por uma nova síntese. O $[^{11}C]CO_2$ é produzido pela reação $^{14}N(p,\alpha)^{11}C$. Passados 10 min de irradiação o equipamento de síntese é abastecido para operação subsequente e o $[^{11}C]CO_2$ é transportado do cíclotron para o equipamento de síntese. O $[^{11}C]$Choline é um radiofármaco utilizado para diagnóstico de tumores localizados no cérebro, pulmão, esôfago, reto, próstata e sistema urinário. A localização do tumor é claramente visível em imagens reconstruídas de dados adquiridos em 5 a 15min após a injeção.

Steel et al [65], em 1999, desenvolveram um sistema completamente automático, baseado em um conjunto modular controlado por um CLP. O sistema de síntese automatizado para a produção do $[^{11}C]$Timidina estava instalado em uma *hot-cell* e foi construído em três módulos. Todas as operações (desligamento de válvulas, controle de temperaturas de fornos e de banhos de óleo , taxas de fluxo de gases e reagentes, cronometragem e duração de cada passo, etc.) eram controlados externamente, usando um CLP *Toshiba EX 40*+. Cada válvula era controlada por uma saída do CLP e o programa *ladder logic*

executava a seqüência de cada passo. Foram realizadas 72 produções, para estudos clínicos, sendo que em somente duas delas ocorreram falhas: uma, em virtude da presença de uma impureza desconhecida e outra, por causa da má qualidade de um reagente. Portanto, nenhuma destas falhas ocorreu em função do controle do sistema. O ^{11}C foi produzido pela reação nuclear $^{14}N(p,\alpha)^{11}C$, usando um porta-alvo de alumínio, contendo uma mistura de 5% de gás hidrogênio em nitrogênio. As irradiações foram feitas no ciclotron *Scandtronix MC40*, com prótons de 19MeV de energia e correntes de 30μA, durante 30min.

Steel et al [66], em 1999, adaptaram o sistema de síntese automática citado anteriormente, utilizando o CLP *Toshiba EX40+*, para a síntese de ^{18}FDG, pois os sistemas continham processos e componentes em comum. O programa de controle foi usado repetidamente, experimentando-se condições de falhas para correções e a confiabilidade dele foi estabelecida baseada em 32 preparações atingidas com sucesso.

Saito et al [67], em 2000, relataram a produção de $^{18}F^-$ utilizando um ciclotron *AVF*, por intermédio da reação $^{18}O(p,n)^{18}F$, para realizar experimentos com a fonte intensa de pósitrons emitidos por este radioisótopo, na pesquisa de materiais. O porta-alvo, confeccionado em Ti, era carregado com água enriquecida em ^{18}O, utilizando-se uma bomba mecânica. O preenchimento do porta-alvo era detectado por um sinal elétrico e o alvo era pressurizado com gás Ar, para evitar formação de bolhas, que poderiam provocar a ruptura das duas folhas de Havar, que separam o alvo do vácuo do ciclotron. O porta-alvo era refrigerado por um fluxo de água na parte traseira e por gás He na parte interna das folhas de Havar (parte frontal do alvo). Um feixe de prótons de 14MeV incidia no alvo com correntes de 1 a 1,6μA, produzindo atividade de $^{18}F^-$ em torno de 2GBq (54mCi), em 1h de irradiação. A solução contendo $^{18}F^-$ era automaticamente transferida, via gás He, por meio de um tubo de Teflon, até a sala experimental. Foi desenvolvido um sistema automatizado de um mecanismo de alimentação da fonte e eletrodeposição, que era controlado por um PC. Não foi citado nenhum detalhe desta automação.

Zeisler et al [68], em 2000, construíram um sistema de alvo automatizado para a produção rotineira de F^-, utilizando-se um alvo de água enriquecida em

^{18}O. Ele consistia de uma pequena câmara esférica de Nb, montada em um porta-alvo especial, que proporcionava uma refrigeração rápida, por um fluxo de água ao redor da esfera. O alvo era preenchido com 1,6mL de H_2O por meio de uma seringa automática e selado com válvulas usadas em HPLC. O alvo foi irradiado no cíclotron *Scanditronix MC32*, do *Centro de Pesquisa de Câncer* alemão, com prótons de 21MeV e a energia incidente na câmara do alvo era de 13MeV. O sistema era operado sem excesso de pressão externa e foi experimentado com correntes de feixe de até 50μA. Depois da irradiação a água irradiada era transferida com gás hélio por meio de tubo capilar de 0,8mm de diâmetro interno, até uma *hot cell* a 25m de distância. Foi extraído 95% do rendimento teórico do [^{18}F]F- e usado para síntese de [^{18}F]2-Flúor-2-Deoxi-D-Glicose. Os autores não mencionaram como foi realizada a automação.

Bergman, et al [69], em 2001, realizaram a automação da síntese e purificação do [^{18}F]Bromofluorometano. O ^{18}F foi produzido pela reação $^{18}O(p,n)^{18}F$, em irradiações de água enriquecida em ^{18}O a 94%, com volume de 400 a 700μL, em uma câmara confeccionada em Ag. O cíclotron modelo *AVF* (Finlândia) fornecia feixes de prótons de 17MeV de energia e 10μA de corrente, por 45min. O rendimento de produção de $^{18}F^-$ obtido foi de aproximadamente 18GBq (486mCi), no *EOB*. O aparato foi controlado por um CLP modelo *A-series*, da *Mitsubishi*. Um PC, equipado com um sistema supervisório modelo *FP-770T* da *Digital Electronics*, foi usado como interface com o usuário. A seqüência automática, bem como a animação do processo e telas com níveis de radioatividade, foram construídos para realizar esta interface com o usuário.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 INFRA-ESTRUTURA

3.1.1 Ciclotron CV-28 e Cyclone 30 do IPEN-CNEN/SP

3.1.1.1 Ciclotron modelo *CV-28*

O ciclotron modelo CV-28, fabricado pela *The Cyclotron Corporation (TCC)* e gerenciado atualmente pelo Centro de Aceleradores Ciclotron do IPEN-CNEN/SP, tem sido utilizado para pesquisas em geral e em diversas aplicações, a saber: análise de elemento traço, estudo de desgaste de peças metálicas, estudo de danos de radiação, produção de fontes de calibração, etc.

O modelo *CV-28* é um acelerador de partículas do tipo isócrono, também chamado de variável, definido por três setores radiais, incorporados às peças polares e possui quatro bobinas auxiliares para ajuste do perfil radial do campo, o que permite acelerar quatro tipos de partículas: prótons, dêuterons, $^{3}He^{++}$ e partículas alfa. Pode ser considerado como compacto, pesando 23 toneladas, localizado em uma área de 60 m^2 e consome uma potência elétrica de aproximadamente 500 kVA. Sua infra-estrutura é composta dos seguintes periféricos:

a) Sistema de fontes de alimentação das bobinas de campo, fonte de íons, deflexão, centralização, sistema de radiofreqüência e de deflexão magnética;

b) Sistema de refrigeração de água deionizada;

c) Sistema de ar comprimido;

d) Sistema de ar condicionado;

e) Sistema de vácuo.

O equipamento está localizado em uma área, chamada de caverna, construída por paredes de concreto, que servem de blindagem da radiação. Na caverna estão instalados o ciclotron propriamente dito, a linha de feixe principal,

o distribuidor magnético e três saídas de linha de feixe (há sete delas, mas somente três estão operacionais), nas quais os alvos são irradiados com feixe externo. A Figura 3.1 mostra a câmara de aceleração do cíclotron CV-28 e o sistema de transporte de feixe.

Figura 3.1: Câmara de Aceleração do Cíclotron *CV-28* e Sistema de Transporte de Feixe instalados na Caverna.

Na Tabela 3.1, estão apresentadas as principais características nominais do cíclotron *CV-28* do IPEN-CNEN/SP.

Tabela 3.1 - Características Nominais do Ciclotron *CV-28* do IPEN-CNEN/SP [9].

Características do Feixe		
Tipo de Íons	Acelerado e Extraído	p; d; $^{3}He^{++}$; $^{4}He^{++}$
Energia (ajustável)	(p) (d) ($^{3}He^{++}$) ($^{4}He^{++}$)	2 - 24 MeV 4 - 14 MeV 6 - 36 MeV 8 - 28 MeV
Corrente Interna Máxima	(p) (d) ($^{3}He^{++}$) ($^{4}He^{++}$)	200 μA 300 μA 135 μA 90 μA
Corrente Externa Máxima	Para energia mínima e máxima	40 – 60 μA (p) 50 – 100 μA (d) 5 - 50μA ($^{3}He^{++}$) 6 – 40 μA ($^{4}He^{++}$)
Número de Linhas Externas		3
Emitância Normalizada do Feixe Extraído	Planos Horizontal e Vertical	<30 mm - mr
Estrutura Magnética		
Número de Setores		3
Ângulo dos Setores		60º
Campo Forte (montes)		2,1 T
Campo Fraco (vales)		1,42 T
Campo Médio		1,74 T
Ampére-volta Máxima		$2,3x10^{-5}$
Potência nas Bobinas		69 kW
Peso		20,5 ton.
Sistema RF		
Número de "dês"		2
Ângulo dos "dês"		90º
Modo Harmônico		2
Freqüência	(p) (d) ($^{3}He^{++}$) ($^{4}He^{++}$)	7,3 – 25,5 MHz 6,5 – 14,0 MHz 6,2 – 18,8 MHz 7,0 - 14,0 MHz
Tensão do Dê	(H+) (D^{+}) ($^{3}He^{++}$) ($^{4}He^{++}$)	5,2 – 24kV 7,2 – 17,6kV 7,2 – 21,6kV 11 – 24,0kV
Fonte de Íons		
Tipo de Fonte	Interna	P.I.G.*
Modos de Operação	*Penning* Termoiônico	2,5kV – 0,4A 0,6kV – 4A
Fluxo de Gás		8 cm^3/min
Sistema de Extração		
Defletor Eletrostático	1	0 – 70kV
Canal Magnético	1	
Distribuidor Magnético	1	0 – 150A

P.I.G.* – *Penning Ion Gauge*

A câmara de vácuo do cíclotron possui um diâmetro polar de 965mm e raio máximo de extração de 420mm. A intensidade do campo magnético médio é de 1,74 T. O sistema de radiofreqüência opera com uma freqüência fixa no intervalo de 6,0 a 25,5 MHz, dependendo da energia e da partícula acelerada.

O imã do cíclotron CV-28 consiste de três regiões de campo forte (montes) e três regiões de campo fraco (vales), simetricamente dispostos em azimute, para fornecer focalização, por setor, do feixe de íons durante a aceleração. Os montes são fabricados com ferro e possuem forma de cunha, com cerca de 60^0 de abertura. O gradiente radial do campo magnético é controlado por bobinas de ajuste, que permitem operação com cada partícula em todos os intervalos de energia. A armadura do imã consiste de dois pólos e duas peças laterais, ajustadas com precisão, para manter uniformidade e alinhamento do campo magnético entre os pólos. Três conjuntos de bobinas harmônicas controlam o primeiro harmônico do campo, para uma ótima eficiência de extração. Os pólos do imã se fecham em duas partes, formando uma câmara de vácuo, que permite elevação da parte superior, dando acesso às regiões de criação e aceleração dos íons para manutenção.

A câmara de vácuo conta com dois sistemas de alto vácuo, compostos por duas bombas de difusão, as quais atingem um vácuo final de 10^{-7} mbar, que é suficiente para ionizar apenas o gás injetado, o qual é posteriormente acelerado, gerando o feixe de íons e também para garantir o isolamento devido à alta tensão gerada no sistema de radiofreqüência e no sistema de extração.

Os íons são gerados por uma fonte do tipo "Penning", montada na posição radial e localizada no centro da câmara de aceleração do cíclotron. Ela utiliza cátodos aquecidos pelos próprios íons (cátodos quentes), eliminando, assim, a necessidade de um filamento e conta com a possibilidade de ajuste tridirecional, para eficiência na geração de íons. Estes íons gerados são acelerados por dois eletrodos em forma de "Dês", de 90^0, que estão conectados a um conjunto indutor localizado no sistema de radiofreqüência, o qual funciona como um circuito ressonante de meia-onda.

O feixe interno pode ser monitorado e otimizado em qualquer raio de aceleração, por meio de uma ponta de prova, dispositivo que é remotamente controlado, possibilitando, assim, medir a posição e a intensidade do feixe. Este dispositivo pode ser completamente retirado, permitindo que o feixe passe por um canal de extração [9].

No cíclotron CV-28, os prótons são extraídos por um canal eletrostático (defletor). Ele é formado por um "septum" (lâmina) feito com uma chapa de cobre muito fina, aterrada (0,3 a 0,7 mm) e um eletrodo negativo (barra), paralelo, localizado a uma distância de 3 mm, para produzir um alto campo eletrostático elevado (150 kV/cm), necessário para extrair a última órbita das partículas (normalmente largura de 1 mm e separadas da órbita precedente por 1mm). Mesmo com uso de técnicas de extração ressonantes, as últimas órbitas do feixe não são separadas e a folha de cobre intercepta uma parte significativa de feixe, apesar de sua espessura reduzida [15]. Devido à variedade de feixe que pode ser extraído com o modelo CV-28, o canal eletrostático foi projetado de modo a permitir um ajuste remoto entre a barra defletora e o "septum".

A Figura 3.2 mostra a câmara de vácuo (principal) do cíclotron *CV-28* (região central de criação e aceleração dos íons), onde são observados a fonte de íons, os "dês", o sistema de extração (defletor) e a ponta de prova.

Após o feixe ser defletido de sua órbita máxima, ele passa por um canal magnético, sendo, então, enviado para o sistema de transporte de feixe. Este consiste, inicialmente, de uma linha de feixe principal, com um sistema de bobinas de centralização ("steering") e focalização (quadrupolares). Um imã distribuidor desvia o feixe para cada uma das sete linhas de feixe externo, a 0°, ± 20°, ± 40°, ± 60°, até atingir o alvo numa destas posições.

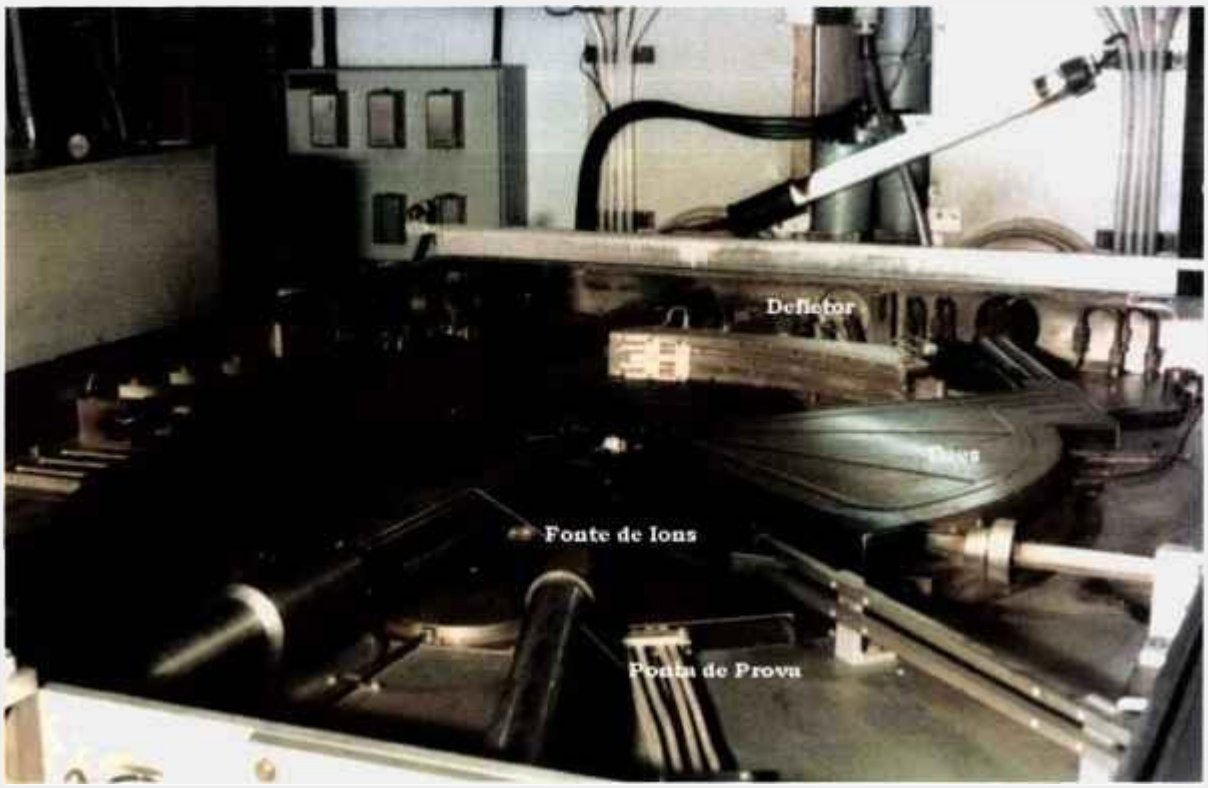


Figura 3.2: Câmara de vácuo do Cíclotron CV-28.

Em cada uma destas linhas também está instalado um sistema de bobinas quadrupolares, para focalização, e um sistema de varredura, que permite uma maior uniformidade do feixe. O sistema de feixe externo atualmente instalado no cíclotron CV-28 do IPEN é composto de uma linha de feixe principal e três linhas secundárias, localizadas a 0^0 e $\pm 40^0$, permitindo irradiações de alvos sólidos, líquidos e gasosos.

A Figura 3.3 mostra uma vista esquemática do cíclotron CV-28: câmara de aceleração, linha de feixe principal, distribuidor magnético e linhas de feixe secundárias. Atualmente são acelerados prótons com energia de 24 MeV e correntes de feixe externo máximo, no alvo, de 30 μA [1, 9, 70].

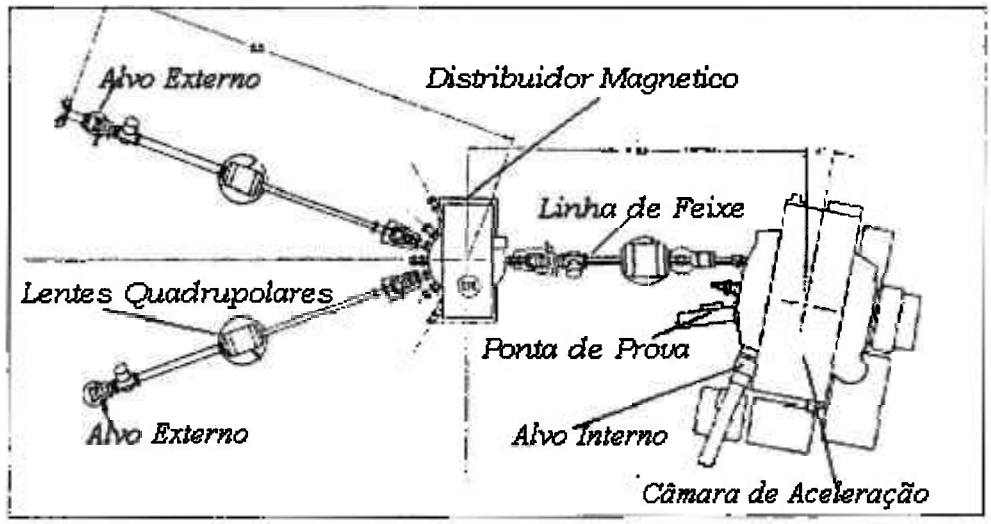


Figura 3.3: Vista esquemática do Cíclotron CV-28 e o Sistema de Transporte de Feixe. No desenho são apresentadas apenas duas linhas externas, para não sobrecarregar a Figura.

3.1.1.2 Cíclotron modelo *Cyclone 30*

O acelerador *Cyclone 30* é um ciclotron de campo fixo e freqüência fixa, que acelera íons negativos (H^-) e é capaz de fornecer um ou dois feixes de prótons. A energia da partícula destes dois feixes pode ser ajustada entre 15 e 30MeV independentemente, pelo posicionamento de uma folha extratora no raio correspondente à energia desejada. A Figura 3.4 mostra a trajetória da partícula para diferentes níveis de energia.

O Cyclone 30 foi projetado especialmente para produção comercial de radioisótopos utilizados na Medicina Nuclear, mas diversas outras utilizações podem ser citadas, a saber, aplicações em indústrias e em pesquisas em geral[71]. Os feixes também podem ser usados diretamente para bombardear alvos colocados em um dos cinco canais de saídas de cada feixe do Cyclone 30 ou guiados para a área experimental por meio de linhas de transporte de feixe.

Muitos alvos específicos são utilizados para a produção de uma variedade de radioisótopos, utilizados em SPET e PET.

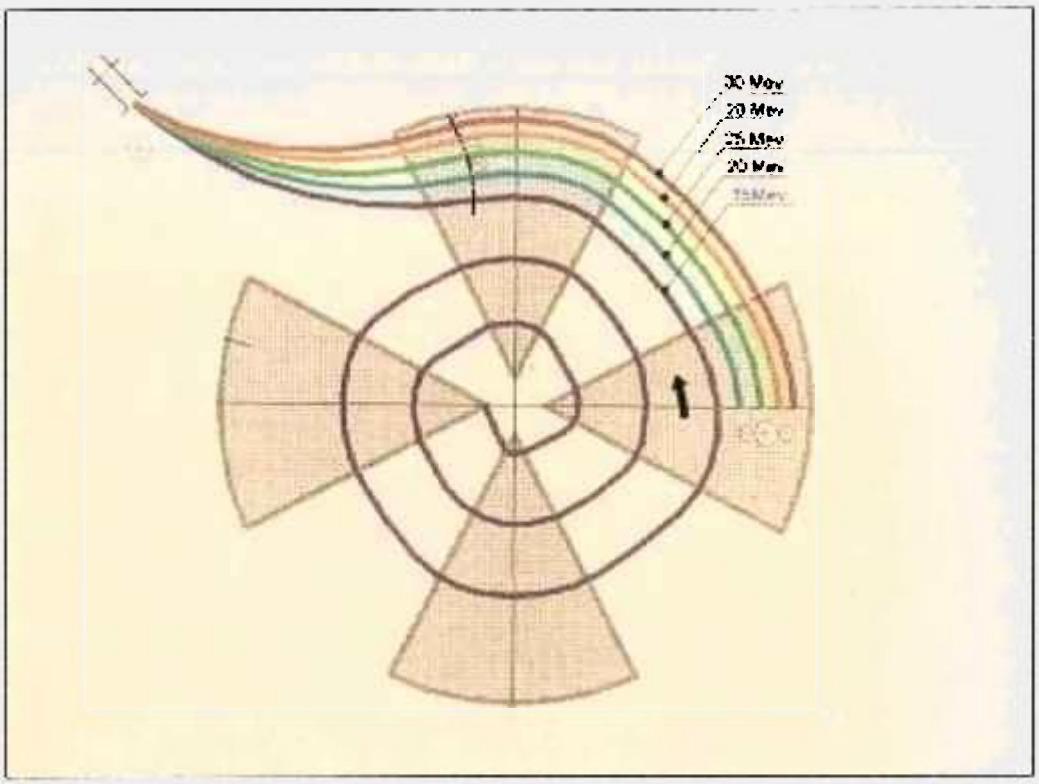


Figura 3.4: Trajetória da partícula no Cyclone 30, para diferentes níveis de energia.

O campo do imã principal é concentrado sobre quatro setores, com uma abertura estreita, que reduz a potência elétrica necessária para estabelecer o campo magnético. A estrutura do imã é um compromisso entre cíclotrons compactos e de setores separados. O campo magnético integrado para cada volta da partícula é de um valor tal que o tempo que a partícula leva para fazer uma volta é sempre constante, independente de sua energia (cíclotron isócrono). Os quatro vales profundos simétricos da estrutura magnética focalizam o feixe durante a aceleração e, além disso, reduz as perdas do feixe.

Os setores são separados por vales profundos, (aproximadamente 1 metro) que acomodam as cavidades de RF. Dois eletrodos ("Dês"), localizados em vales opostos são ajustados para 50kV, em uma freqüência de 66 MHz. A baixa capacitância dos "Dês" e a geometria especial dos ressonadores permitem que esta tensão seja atingida com uma faixa de dissipação de potência, de 5kW por cavidade.

Os "Dês" estão localizados em dois vales opostos do magneto e cada "Dê" é suportado por uma haste vertical, o qual é ressonante em um modo de um

quarto de comprimento de onda, sendo a própria haste conectada à cavidade de ressonância. Os dois "Dês", de 30^0, operam no modo de segundo harmônico com relação à freqüência de revolução da partícula.

O sistema de RF é, essencialmente, um amplificador de alta potência, que amplifica um sinal senoidal de um oscilador com um pequeno cristal de quartzo para uma potência alta de 40 kW, que é fornecida para os dois pares opostos de eletrodos de aceleração ("Dês"), localizados dentro da câmara do cíclotron. Este oscilador a quartzo garante a perfeita estabilidade de freqüência do sistema de aceleração de RF, que é totalmente refrigerado. O estágio final do sistema, liberando 40 kW de potência de RF, é capacitivamente acoplado aos "Dês" e está localizado diretamente no cíclotron, evitando, desta maneira, a necessidade do uso de grandes cabos de RF. A câmara de vácuo é feita de alumínio para reduzir a ativação [73].

O Cyclone 30 é equipado com uma fonte de íons de alta intensidade, do tipo "Multicusp". Esta fonte alimenta íons de H^- para o cíclotron, por meio de uma linha de injeção axial. Esta fonte é externa, o que facilita o acesso e a manutenção, evitando, também, o acúmulo de hidrogênio no tanque (câmara) de vácuo principal. A linha de injeção inclui um sistema magnético de focalização, para obter uma boa eficiência entre a fonte e o plano médio do cíclotron. Um inflector eletrostático, localizado no centro da câmara, desvia o feixe injetado para sua trajetória inicial de aceleração.

O Cyclone 30 acelera os íons H^- e a extração do feixe é realizada por uma folha fina de carbono (*"stripper foil"*), que arranca os dois elétrons do íon H^-, invertendo, assim, a carga da partícula, produzindo o feixe de prótons. Os íons resultantes, carregados positivamente, são, então, naturalmente curvados para fora por um campo magnético, passando por um canal magnético. O feixe obtido por este método garante virtualmente uma extração de quase 100% do feixe acelerado.

Cada folha de carbono pode suportar aproximadamente 40.000 μAh de carga. A folha de carbono, fixada em um suporte, pode ser substituída, sem necessidade de ventilar o cíclotron e sem a intervenção do operador na caverna.

Isto é viável, porque o Cyclone 30 possui dois dispositivos de carregamento automático, cada um contendo 11 folhas de carbono prontas para serem automaticamente substituídas na posição de irradiação. Tanto a substituição como o posicionamento da folha de carbono na câmara de aceleração são feitos remotamente via CLP. O sistema de extração também permite a extração de dois feixes simultâneos, dispostos a 180^0, por meio de ajuste da posição das folhas.

O bombeamento de vácuo da câmara aceleração do Cyclone 30 é feito com duas bombas criogênicas, localizadas sob o cíclotron. A fonte de íons, externa, tem seu próprio sistema de vácuo, para prevenir que os gases da fonte entrem na câmara aceleração. O vácuo final obtido é tipicamente de $2x10^{-7}$mbar. Sensores "Penning" e "Pirani" são utilizados para medidas de vácuo na câmara. Estes valores são transferidos para o sistema de controle, comunicando o estado real de vácuo para o usuário: caso positivo, um sinal "vácuo ok" é mostrado no console de controle; caso negativo, aparece um sinal "vácuo não ok" (por exemplo, se ocorrer perda de vácuo) e o sistema de operação do RF e da fonte de íons são automaticamente desligados e o controle do sistema de vácuo automaticamente reinicia o ciclo de bombeamento. Cada linha de feixe possui um sistema de bomba de difusão independente.

Toda a operação do Cyclone 30 é gerenciada pelo software "In Touch" incluindo fonte de íons, RF e vácuo. A corrente de feixe é medida na linha de injeção, no ponto de extração, na entrada e na saída da linha de transporte de feixe. Estas medidas são visualizadas na tela de um monitor e são usadas pelo sistema de controle para ajuste, em tempo real, dos parâmetros do feixe e também como intertravamentos para a segurança de pessoal e para o equipamento em si. O "InTouch" se comunica com a segunda parte do sistema de controle, que é baseado em um CLP "Simatic STEP 5" da "Siemens". A Figura 3.5 mostra os sistemas que fazem parte do Cyclone 30 [71].

:OMISSAO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP IPEN

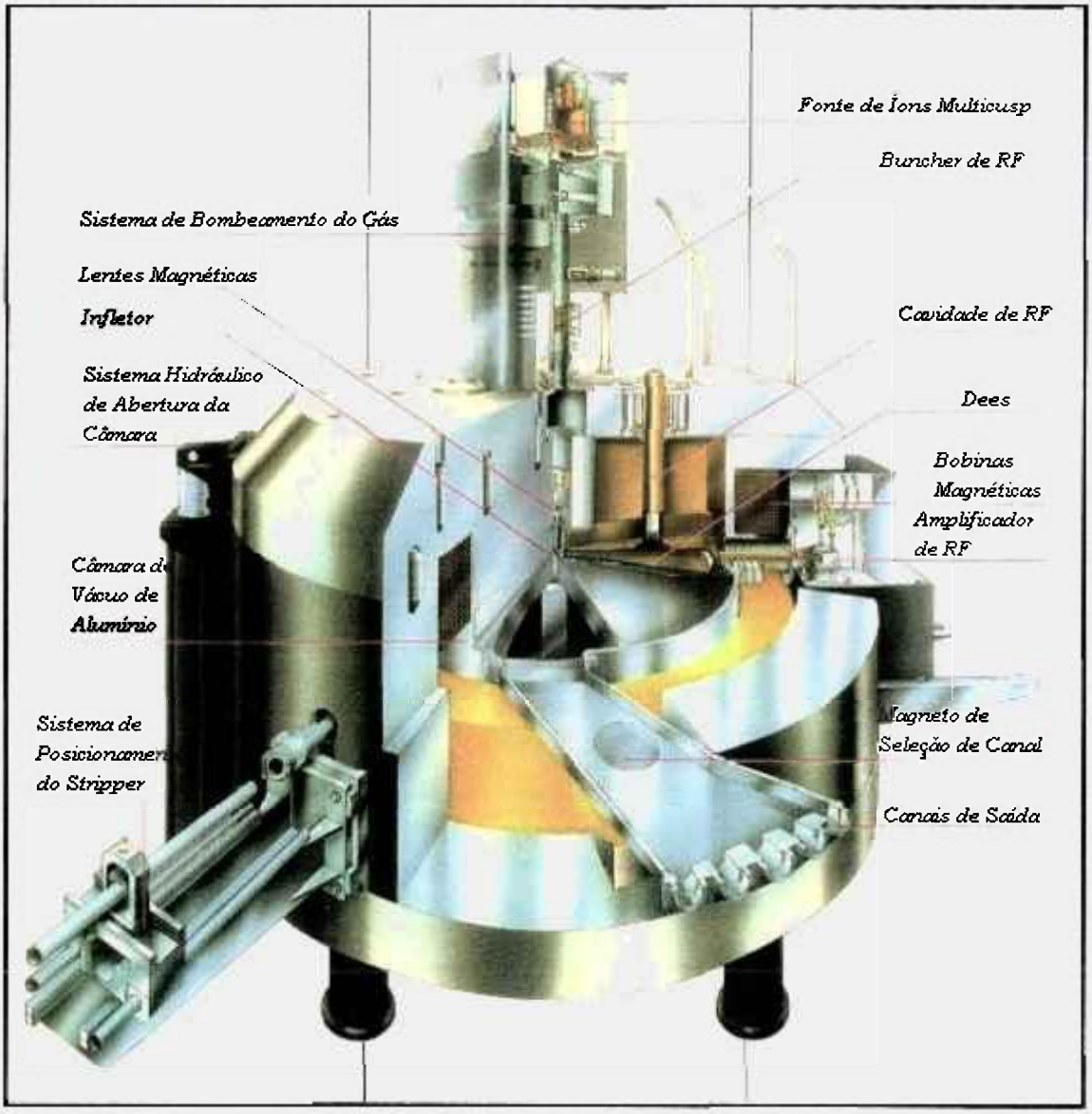


Figura 3.5: Desenho esquemático do Cyclone 30, mostrando todos os seus sistemas.

A Figura 3.6 mostra o Cyclone 30 instalado atualmente no IPEN, quando ainda estava nas dependências da fábrica da *IBA*, na Bélgica.

A Tabela 3.2 mostra as características nominais do Cyclone 30 do IPEN.

Na Figura 3.7 pode ser vista a localização dos cíclotrons CV-28 e Cyclone 30 no prédio do Centro de Aceleradores cíclotron.

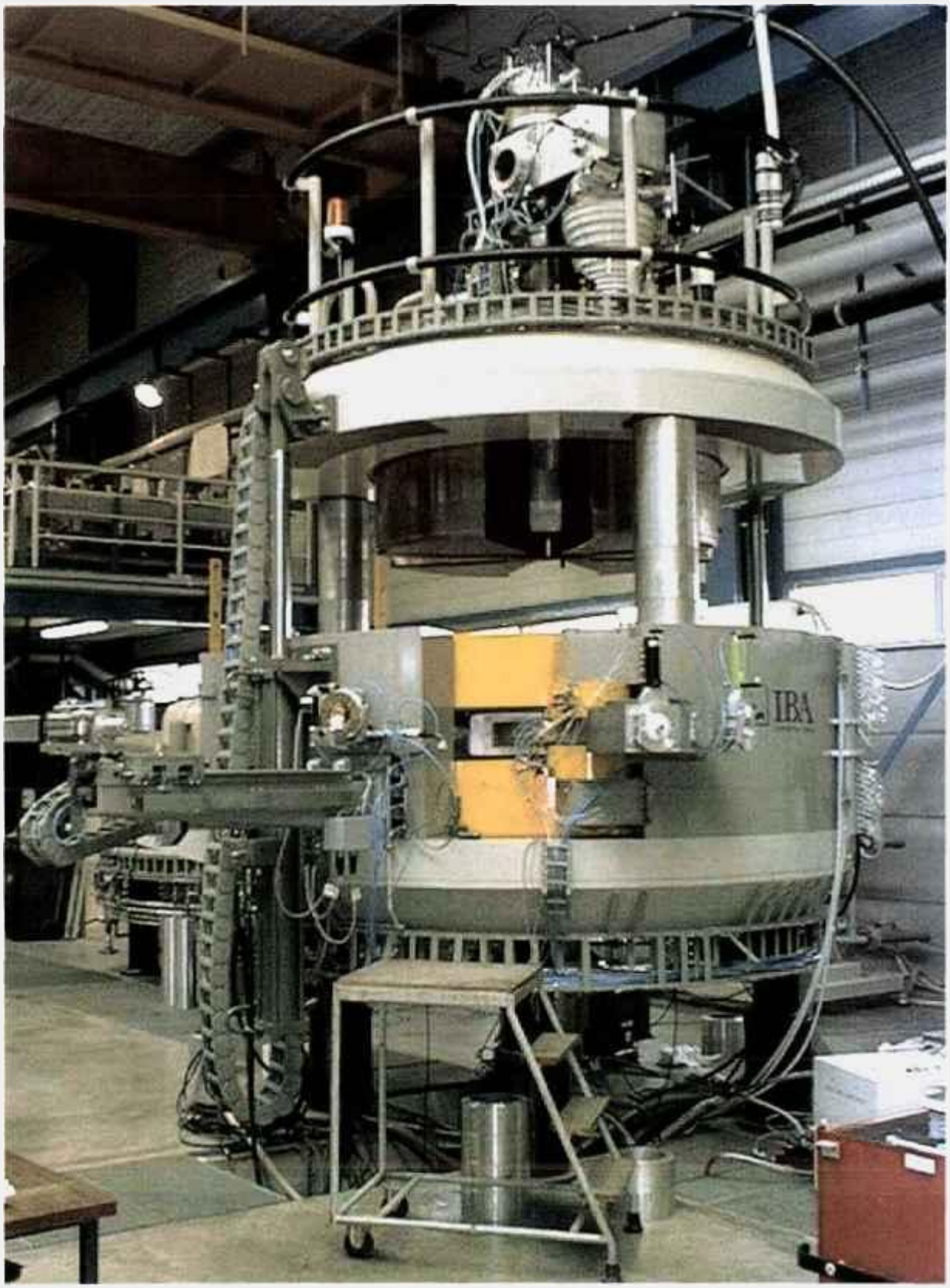
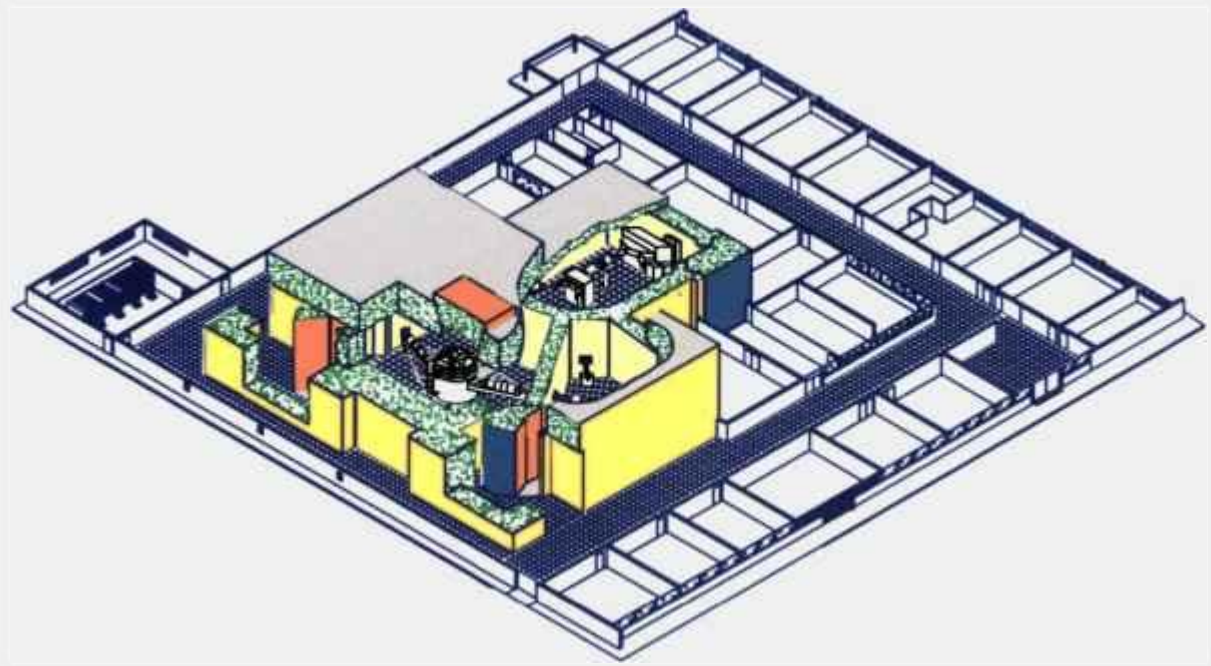


Figura 3.6: Cyclone 30 instalado no IPEN-CNEN/SP, quando ainda estava nas dependências da fábrica da *IBA*, na Bélgica.

Tabela 3.2 - Características Nominais do Cíclotron Cyclone 30 do IPEN-CNEN/SP [71].

Características do Feixe		
Tipo de íons	Acelerado Extraído	H- p
Energia (ajustável)	máxima mínima	30 MeV 15 MeV
Intensidade garantida		300 μA
Número de canais de saída		6
Número de feixe extraídos simultaneamente		2
Emitância normalizada do feixe extraído	Horizontalmente Verticalmente	<10 π.mm.mrad <5 π.mm.mrad
Consumo de Potência		
Até 30 MeV, usando uma linha de feixe	125kW	250kVA
Até 30 MeV, usando duas linhas de feixe	140kW	280kVA
Estrutura Magnética		
Número de setores		4
Campo forte (montes)		1,7 T
Campo fraco (vales)		0,12 T
Potência nas bobinas		7,2 kW
Peso		45 ton.
Sistema de Controle		
Software	Software *In Touch* Software *Simatic S5*	
Hardware	Controlador Lógico Programável (CLP) compatível PC IBM	
RF Sistema		
Número de dês	conectados no centro	2
Ângulo dos dês		30º
Modo harmônico		4
Freqüência fixa		65,5 MHz
Tensão do Dê		50 kV
Potência RF dissipada	Por "dê"	5,5 kW
	Aceleração do feixe	21,0 kW
Fonte de Íons		
Tipo de Fonte	Externa	MULTICUSP
Potência do filamento		2kW
Tempo de vida do filamento		>200h
Tempo para reparar filamento		<15 min.
Potência do Arco		4kW
Taxa do fluxo de H_2	Máximo	15 std cc/min
	Mínimo	10 std cc/min
Polarização da fonte		28kW
Corrente de H- máximo		7mA



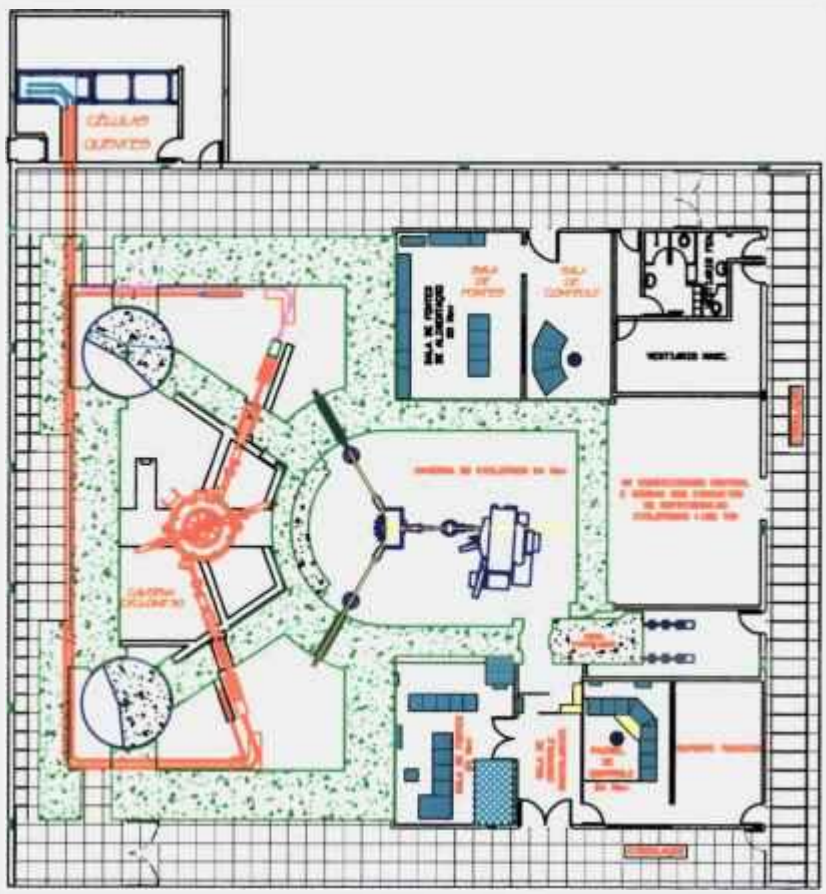


Figura 3.7: Localização dos Cíclotrons CV-28 e Cyclone 30 do IPEN-CNEN/SP.

3.2 SISTEMA DE IRRADIAÇÃO DE ALVOS

Os sistemas de irradiação de alvos devem ser projetados de tal forma que facilitem as operações: reparo de janelas (que separam o alvo do vácuo do cíclotron), manutenção no sistema de refrigeração do suporte dos alvos, etc., tornando possível suas execuções no menor tempo possível. Estes sistemas são colocados no final da linha de transporte do feixe, em uma das saídas após o distribuidor magnético de feixe. Um final da linha de feixe típico contém os seguintes dispositivos, na respectiva seqüência:

a) uma válvula de feixe (*Beam Gate*): esta válvula, do tipo gaveta, faz a interface cíclotron - Sistema de Irradiação;

b) colimador de quatro setores: consiste de quatro blocos metálicos (normalmente em alumínio) isolados eletricamente da linha e entre si, permitindo a medida de corrente nos quatro quadrantes simultaneamente;

c) *Beam Stopper* possibilita a otimização do feixe antes de atingir o material a ser irradiado. Geralmente é de acionamento pneumático;

d) porta-alvo propriamente dito: dispositivo onde o material a ser irradiado (alvo) é fixado.

A Figura 3.8, mostra o distribuidor magnético, linhas de feixe e local onde foram instalados os sistemas de irradiação no cíclotron CV-28 do IPEN-CNEN/SP.

Em geral, os sistemas de irradiação são constituídos de uma pré-câmara, na qual são acoplados os porta-alvos e os respectivos alvos (sólido, líquido ou gasoso). Estes (porta-alvos e alvos) recebem uma preparação inicial antes de serem irradiados, sendo confeccionados de tal modo que suportem operar em vácuo e possam ser refrigerados (pois há uma grande geração de calor devido ao feixe). Durante a irradiação, a pressão interna no alvo e na janela (folha metálica refrigerada com gás Hélio ou água, que separa o alvo da linha de feixe) devem ser controladas, porque, com o aumento da temperatura no alvo, há um aumento da pressão, que pode causar o rompimento da janela ou volatilização do alvo. Também, durante a irradiação, deve ser medida e controlada a corrente de feixe no alvo (dada em μA) e esta deve ser integrada no tempo, para controle da carga

depositada Q (dada em μA.h), que é utilizada no controle da atividade final do produto obtido pela irradiação.

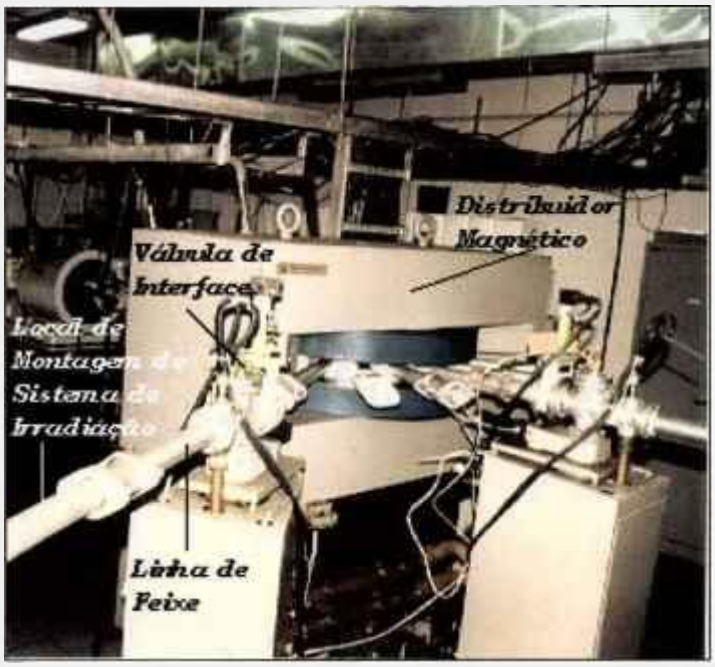


Figura 3.8: Distribuidor Magnético, Linhas de Feixe e Local onde foram montados os Sistemas de Irradiação do Cíclotron CV-28 do IPEN-CNEN/SP.

A Figura 3.9 mostra um diagrama esquemático de um sistema de irradiação.

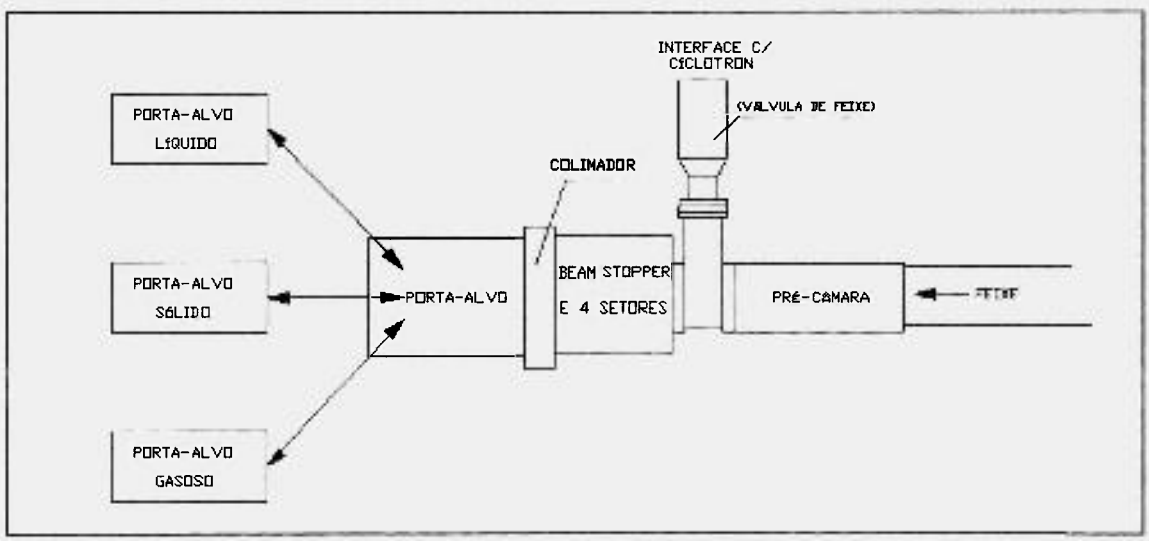


Figura 3.9: Diagrama esquemático de um Sistema típico de Irradiação de Alvos.

Para este trabalho, um sistema de irradiação foi desenvolvido, de modo a permitir a execução do Projeto de Automação. Desta maneira, no processo de irradiação, para o feixe atingir o alvo é necessário abrir a válvula de feixe (válvula de interface), tornando o conjunto cíclotron-sistema de irradiação uma câmara de vácuo em equilíbrio. Uma seqüência geralmente adotada e que serviu como procedimento de controle para o projeto pode ser descrita:

a.1 - Pré-vácuo – um sensor tipo "Pirani" indica dois níveis de pressão, da ordem de 10^{-2}mbar e pressão atmosférica. Uma das condições necessária para a válvula de feixe poder ser aberta é a pressão no sistema atingir um valor de 10^{-2}mbar. Caso esta seja maior que este valor, ela deve ser fechada automaticamente.

a.2 - Refrigeração no caso de alvos sólidos e gasosos – Uma chave de fluxo indica passagem de água e um termopar indica a temperatura da água, de refrigeração. Caso a temperatura ultrapasse um valor preestabelecido ou ocorrer uma anomalia na refrigeração, o *Beam Stopper* é acionado, bloqueando o feixe. Se o problema persistir, após um período de tempo, a válvula de feixe deve ser fechada.

a.3 - Pressão na janela do alvo: um sensor de pressão indica a pressão do gás hélio de refrigeração nas janelas. Caso ultrapasse um limite superior preestabelecido, a válvula de feixe deve ser fechada.

a.4 - Interface cíclotron - Sistema de Irradiação: a válvula de feixe aberta indica que o sistema está em condições de ser irradiado e ela fecha automaticamente quando ocorre qualquer anomalia.

a.5 – Controle de corrente de feixe no alvo: *Um* sinal de corrente (I) de feixe é medido (Copo de Faraday) e integrado no tempo (carga Q).

$$Q = \int I dt$$

O valor de Q define a carga total depositada no alvo. Portanto, a dose final, que é solicitada pelo usuário, é um comparador para determinar o final da irradiação.

a.6 – Coleta do alvo irradiado: Após a irradiação, o material alvo dever ser coletado e enviado para uma sala de manipulação (*Hot Cell*). Para cada tipo de alvo (sólido, líquido ou gasoso), existe uma seqüência de operações típicas e

diferenciadas, que serão citadas posteriormente, quando for feita a descrição de cada porta-alvo.

3.3 PROJETO DE PORTA-ALVOS

Foram projetados três porta-alvos, para irradiação de alvos sólidos, líquidos e gasosos, onde se levou em consideração diversos fatores:

- Possibilidade de utilização de alvos enriquecidos, que possuem um alto custo. Nos três casos, levou-se em conta a quantidade adequada de material, que deveria ser recuperado no processamento químico. Além disso, empenhou-se em implementar sistemas de alvos convenientes para produção de radioisótopos, e que fossem importantes para o uso na Medicina Nuclear.

- Emprego de tipos que possuíam características específicas, sendo os mais complexos possíveis e que tivessem o maior número de etapas para serem controladas. Um exemplo que pode ser citado é o do alvo líquido, onde seu sistema de refrigeração, carregamento e coleta, exigiram, em função da sua complexidade, uma solução mais específica em termos de controle e automação.

- Desenvolvimento de porta-alvos com um sistema de refrigeração eficiente, como a utilização de materiais que permitiam uma eficiente transferência de calor, e por conseguinte, que tenham uma capacidade de suportar altas correntes de feixe. Como a construção de porta-alvos específicos não era o objetivo central do trabalho e sim a automação, em termo de seu controle, procurou-se trabalhar com porta-alvos já desenvolvidos e pesquisados. Entretanto, os detalhes de construção tiveram que ser totalmente definidos, uma vez que diversas informações técnicas normalmente não são fornecidas ou explicitadas em citações bibliográficas.

3.3.1 Porta-alvo para Irradiação de Alvos Sólidos

O porta-alvo foi fabricado em Alumínio e projetado para a irradiação de alvos eletrodepositados em uma placa suporte de cobre niquelada, de dimensões (72x27) mm^2.

A placa suporte, com o alvo eletrodepositado, é colocado em uma fenda situada na parte móvel do porta-alvo e preso por sucção, por meio de uma válvula de vácuo "tipo ventosa". O porta-alvo é fechado automaticamente por um cilindro pneumático, permitindo a colocação e retirada do alvo. Após a fixação deste, é possível fazer o vácuo e em seguida ligar a refrigeração, a qual é realizada com água deionizada, na parte traseira dele (refrigeração 2π). O fluxo de água que circula nesta parte é monitorado por um sensor, que detecta sua passagem e envia um sinal para o CLP, para que ele seja controlado. A temperatura de refrigeração também é monitorada por um sensor tipo "termopar", que envia um sinal para o CLP. Após o final da irradiação, a refrigeração é desligada e o porta-alvo é purgado para retirada da água residual. A parte móvel do porta-alvo pode ser aberta, para que o alvo seja retirado e encaminhado para a cápsula de coleta. O desenho esquemático deste porta-alvo é mostrado na Figura 3.10. Este porta-alvo é similar ao descrito por Michael et al [33] e é o mesmo projetado pelo IPEN, para a produção de ^{67}Ga, irradiando-se Zn. Porém, todas as funções de carregar, ventilar, purgar, e transportar o alvo até a célula de manipulação foram exercidas pelo controle automático desenvolvido neste trabalho. O mesmo controle pode ser aplicado no porta-alvo utilizado durante muitos anos pelo IPEN [24] para a produção de ^{123}I via óxido de telúrio.

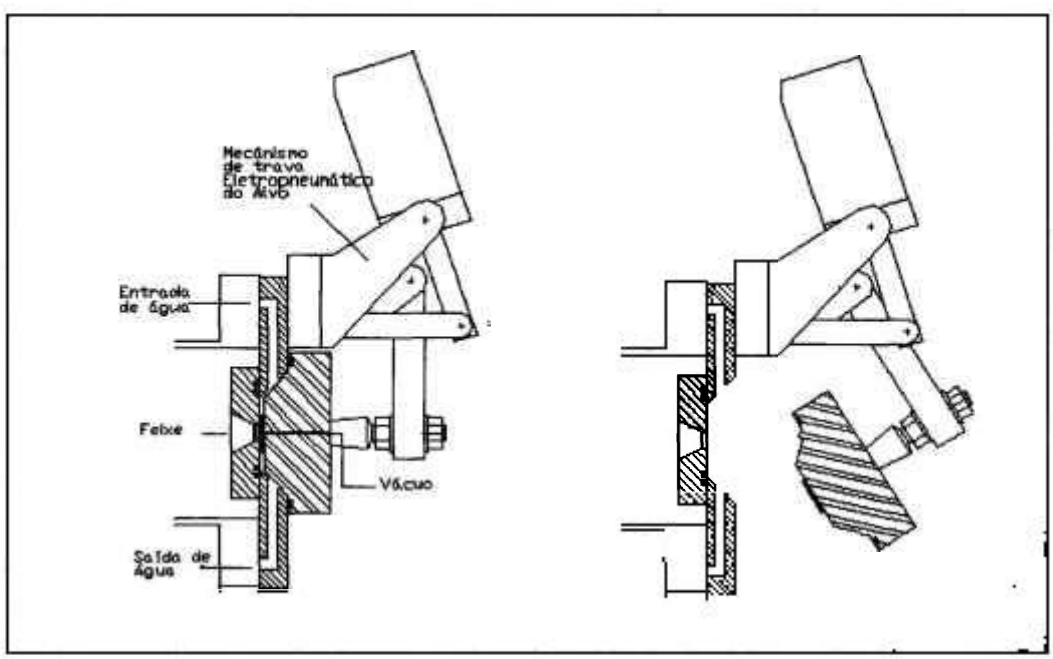


Figura 3.10: Desenho esquemático do Porta-alvo para Irradiação de Alvos Sólidos.

3.3.2 Porta-Alvo para a Irradiação de Alvos Gasosos

O porta-alvo para a irradiação de gases foi fabricado em cobre e niquelado, para minimizar a corrosão na parede interna. A confecção não foi feita em bloco de níquel, pois além do custo ser muito mais alto, o cobre é melhor condutor de calor. A câmara do alvo foi construída em geometria cônica, com comprimento de 120mm, com bases paralelas, 13mm de diâmetro na parte frontal e 30mm na parte traseira. Utilizou-se esta geometria cônica para facilitar a abrangência do feixe dentro do gás, pois o feixe se torna mais amplo ao longo do seu caminho, devido ao seu espalhamento. Uma outra vantagem é que a quantidade de gás necessária para preenchimento do alvo é menor. Altas intensidades de correntes de feixe em alvos gasosos reduzem a densidade do gás[4].

O porta-alvo possui quatro conectores, que são acoplados a quatro válvulas, as quais permitem o carregamento do alvo com gás a ser irradiado, escape de segurança, recuperação, vaporização (para lavar o porta-alvo) e coleta do alvo, além de um sensor de pressão. Sua refrigeração é feita com água deionizada, que flui por vários canais ao longo de todo o cone.

Como o material de alvo é um gás, houve a necessidade de separar a câmara do alvo, que possui alta pressão, da linha de feixe do ciclotron, pois está em vácuo. Para este fim, duas janelas de Havar, de 25μm de espessura cada, foram utilizadas e presas em uma flange de Alumínio. Estas são refrigeradas internamente com fluxo de gás Hélio, para prevenção de uma eventual ruptura das folhas. A construção desta configuração é complexa, uma vez que necessita-se de alto fluxo de gás refrigerante e falhas nestas janelas limitam o desempenho deste porta-alvo. Todo cuidado deve ser tomado neste sentido, de tal forma que se evite a reposição destas folhas com freqüência.

O desenho esquemático do porta-alvo para irradiação de alvos gasosos é mostrado na Figura 3.11. Este porta-alvo é similar ao descrito por Blessing et al [62] e sua automação foi feita visando a produção de ^{82m}Rb.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP IPEN

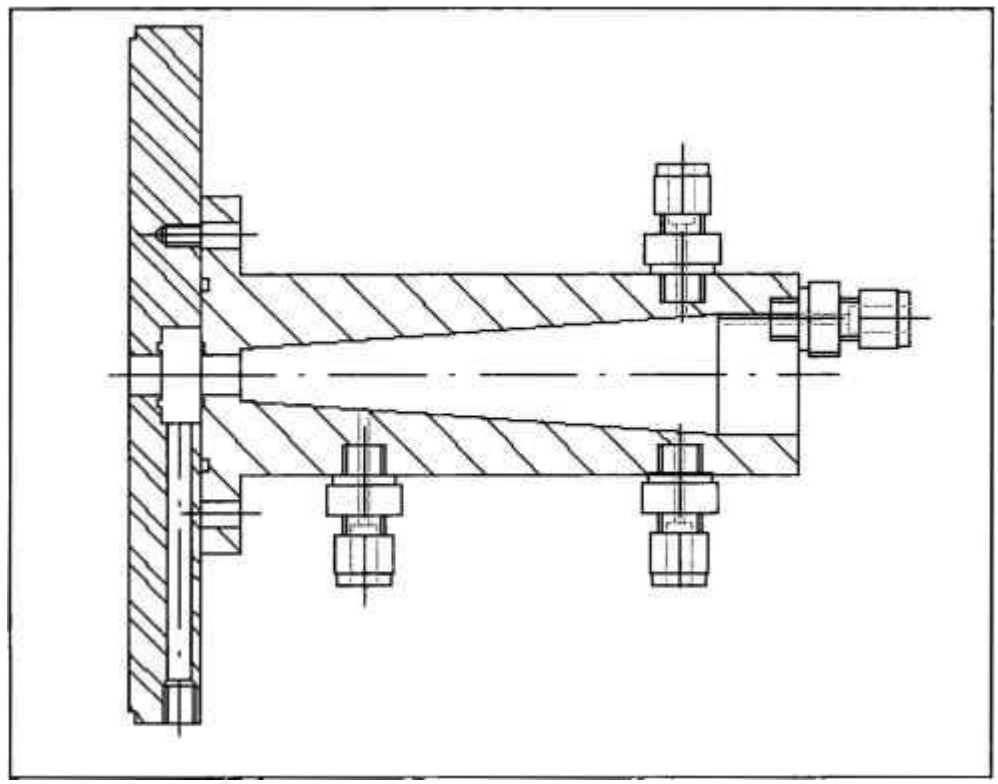


Figura 3.11: Desenho esquemático do Porta-alvo para Irradiação de Alvos Gasosos.

Como nos sistemas de produção normalmente se usa material alvo altamente enriquecido (geralmente tem alto custo), um requisito adicional é a alta confiabilidade do sistema, tal que o gás não irradiado possa ser recolhido no final do bombardeamento, ou ainda, ser recuperado se ocorrerem falhas. Na confecção deste alvo, todos estes parâmetros foram considerados. Para a recuperação do gás e uma eventual emergência, foi desenvolvido um sistema que permite o bombeamento do gás via método criogênico. Este sistema contém um *dewar* de aço inoxidável para confinamento de nitrogênio líquido, acionado por um cilindro pneumático, que congela o reservatório do gás, que consiste de um recipiente de aço inoxidável com 50mL de volume, conforme pode ser visto no desenho esquemático da Figura 3.12. O recipiente de armazenagem e os tubos de conexão são evacuados antes da transferência do gás do porta-alvo para o recipiente de armazenagem e vice-versa.

Uma unidade de segurança foi adicionada ao sistema de recuperação, para evitar a perda do gás, no caso de ruptura da janela que separa o porta-alvo

da linha de feixe. A ruptura é detectada por mudanças de pressão tanto na câmara do alvo como no circuito de hélio. A mistura gasosa é enviada, então, para um cilindro de 50mL, o qual é refrigerado com nitrogênio líquido.

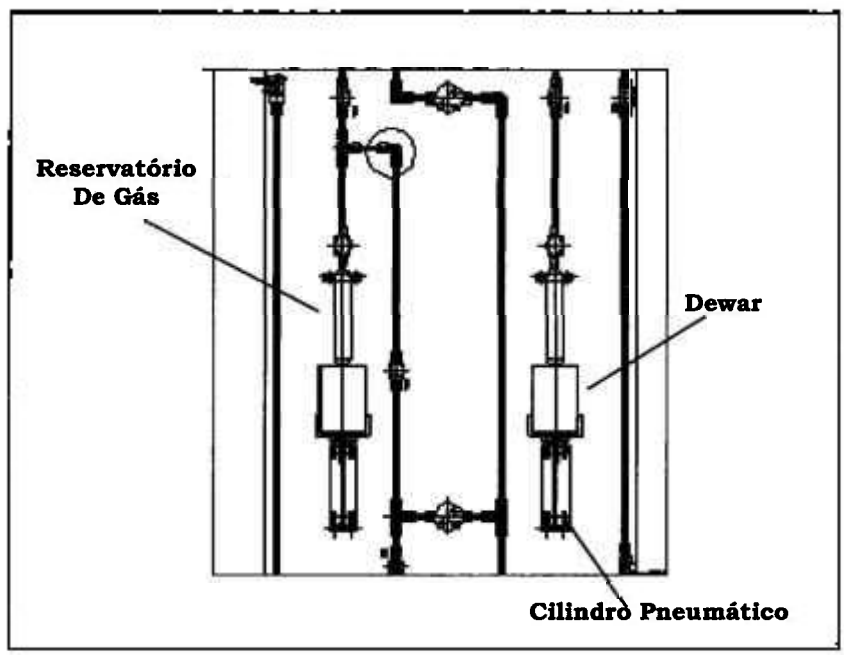


Figura 3.12: Sistema de bombeamento do gás (via método criogênico), com *dewar* de aço inoxidável, acionado por um cilindro pneumático.

Um sistema de geração de vapor e lavagem do porta-alvo com água foi desenvolvido para a remoção do produto radioativo, que é produzido e depositado nas paredes internas do porta-alvo. O vapor é gerado bombeando-se água por meio de um tubo de Cu à temperatura de 500°C, que é controlada por reguladores de temperatura automáticos. A água é forçada por meio do tubo com uma seringa acionada por um cilindro pneumático, em ciclos de 5mL, até que toda a atividade seja removida das paredes. Esta água é convertida em vapor e introduzida na câmara do alvo utilizando-se uma válvula *Swagelok* especial para altas temperaturas. Um tubo de aço inoxidável dentro da câmara de irradiação, contendo um grande número de pequenos orifícios (tipo chuveiro) na superfície, permite uma distribuição de vapor no alvo. O tubo está localizado dentro do porta-alvo, próximo à superfície, tal que o feixe de bombardeamento não o atinja. Cerca de uma hora após o fim da irradiação, é iniciado o processo de vaporização e a água condensada contendo o material irradiado é coletada no fundo da câmara, de onde é transferida para o recipiente de mistura. As frações de água

de enxague são coletadas em um recipiente de vidro, no final do último ciclo de vaporização, pelo qual a maior parte da atividade do gás irradiado é coletado. A solução é misturada com um sal (NaCl), utilizando-se gás hélio pressurizado. A solução misturada é então coletada com o auxílio de uma seringa acionada por um cilindro pneumático em um recipiente evacuado. A Figura 3.13 mostra um desenho esquemático deste sistema.

Após este processo, a superfície interna da câmara é seca com gás nitrogênio (N_2), aquecido a 300°C, por meio de uma unidade de aquecimento, empregando-se o mesmo circuito de aquecimento para geração de vapor. Após a secagem, a câmara do alvo é evacuada até 10^{-2}mbar e mantida sob vácuo até o próximo uso.

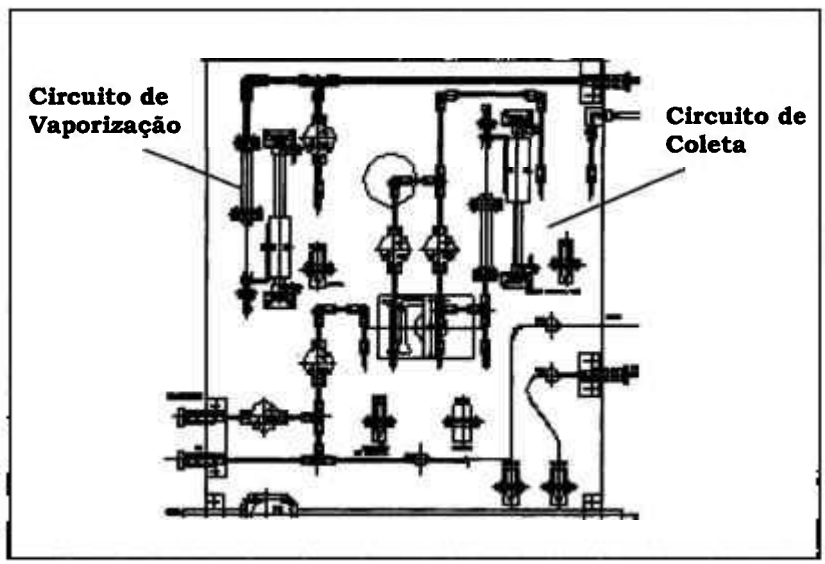


Figura 3.13: Sistema de geração de vapor, lavagem e coleta do alvo.

3.3.3 Porta-alvo para Irradiação de Alvos Líquidos

Para irradiar alvos no estado líquido, foi projetado um porta-alvo cônico criogênico [14] (pois é um dos mais complexos), levando-se em consideração os efeitos de comprimento e o número de ranhuras de refrigeração (para melhor eficiência, evitando-se a volatilização do alvo).

O porta-alvo foi fabricado em cobre, com uma base de 20mm de diâmetro, ângulo de 30º e comprimento de 50mm. Possui, ainda, aletas que permitem uma melhor refrigeração. O cone está localizado em uma câmara criogênica cilíndrica, com diâmetro de 125mm e 124mm de comprimento, isolada a vácuo e preenchida com nitrogênio líquido, cuja função é congelar o material alvo e mantê-lo congelado durante a irradiação. Um sistema injetor, preso a um posicionador linear na frente do alvo, faz o seu carregamento com o líquido vaporizado. A fixação do alvo é feita por meio de uma válvula tipo gaveta, acoplada a um fole, permitindo uma rotação do alvo em 90º, após a irradiação, para ser feita a coleta do líquido irradiado. O desenho esquemático deste porta-alvo é mostrado na Figura 3.14. A construção deste porta-alvo foi baseada no descrito por Shefer al [34], para irradiação de água, visando a produção de ^{18}F.

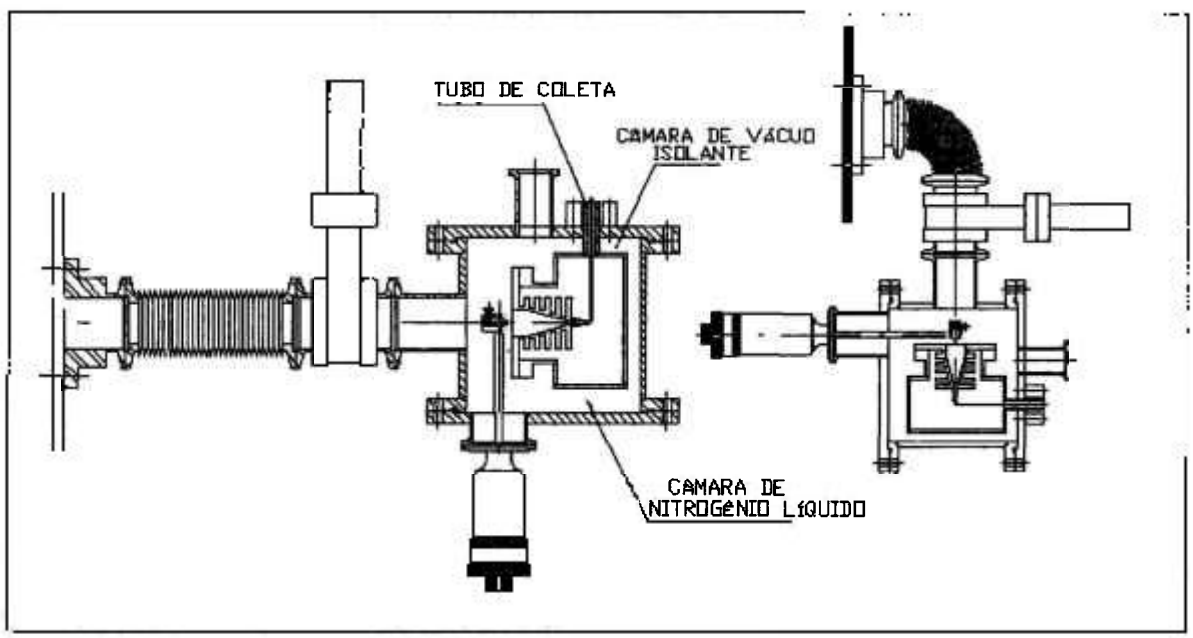


Figura 3.14: Desenho esquemático do Porta-alvo para Irradiação de Alvos Líquidos.

Neste porta-alvo, o material alvo fica na forma sólida durante o bombardeamento: ele foi projetado para não se utilizar janela de separação com a linha de feixe (em vácuo) do ciclotron.

Em alvos líquidos, utilizando-se altas correntes de feixe e altas energias, a grande quantidade de potência depositada pelo feixe no material alvo pode levá-lo ao estado de ebulição e a uma alta taxa de radiólise. Estes efeitos aumentam a fadiga sobre a janela e também provocam a perda de material alvo durante o bombardeamento. Em um alvo no estado sólido, as bolhas são eliminadas e a taxa de radiólise é fortemente reduzida. Em um dispositivo criogênico sem janela, a pressão de vapor do gelo pode ser mantida em um valor bem abaixo da pressão máxima aceitável de vácuo, que é em torno de 10^{-5}mbar na linha de feixe do cíclotron.

Foi instalado, ainda, um termopar para controle e monitoração da temperatura do gelo (alvo). Para manter a temperatura baixa na superfície do gelo durante a irradiação, é conveniente espalhar o feixe sobre uma grande área e usar uma camada fina de alvo, para realizar uma troca de calor eficiente do refrigerante nitrogênio líquido. Todas estas condições podem ser satisfeitas utilizando-se uma geometria de alvo cônico.

A câmara criogênica, na qual está contido o alvo, foi montada em uma outra, sob vácuo, que funciona como isolamento térmico, evitando perdas do elemento refrigerante. Caso ocorram perdas do elemento refrigerante, um controlador de nível acoplado a um sensor (que detecta esta perda), envia um sinal para o CLP e as válvulas de preenchimento de nitrogênio líquido são acionadas. Na flange de cima da câmara criogênica, foram conectados tubos, também isolados em vácuo, que são usados para a alimentação do nitrogênio líquido, purga, entrada de um aquecedor (para retirada de nitrogênio líquido após a irradiação), entrada de sensor de controle de nível e tubo de coleta. O esquema da câmara de isolamento térmico e acoplamento do porta-alvo criogênico pode ser vista na Figura 3.15.

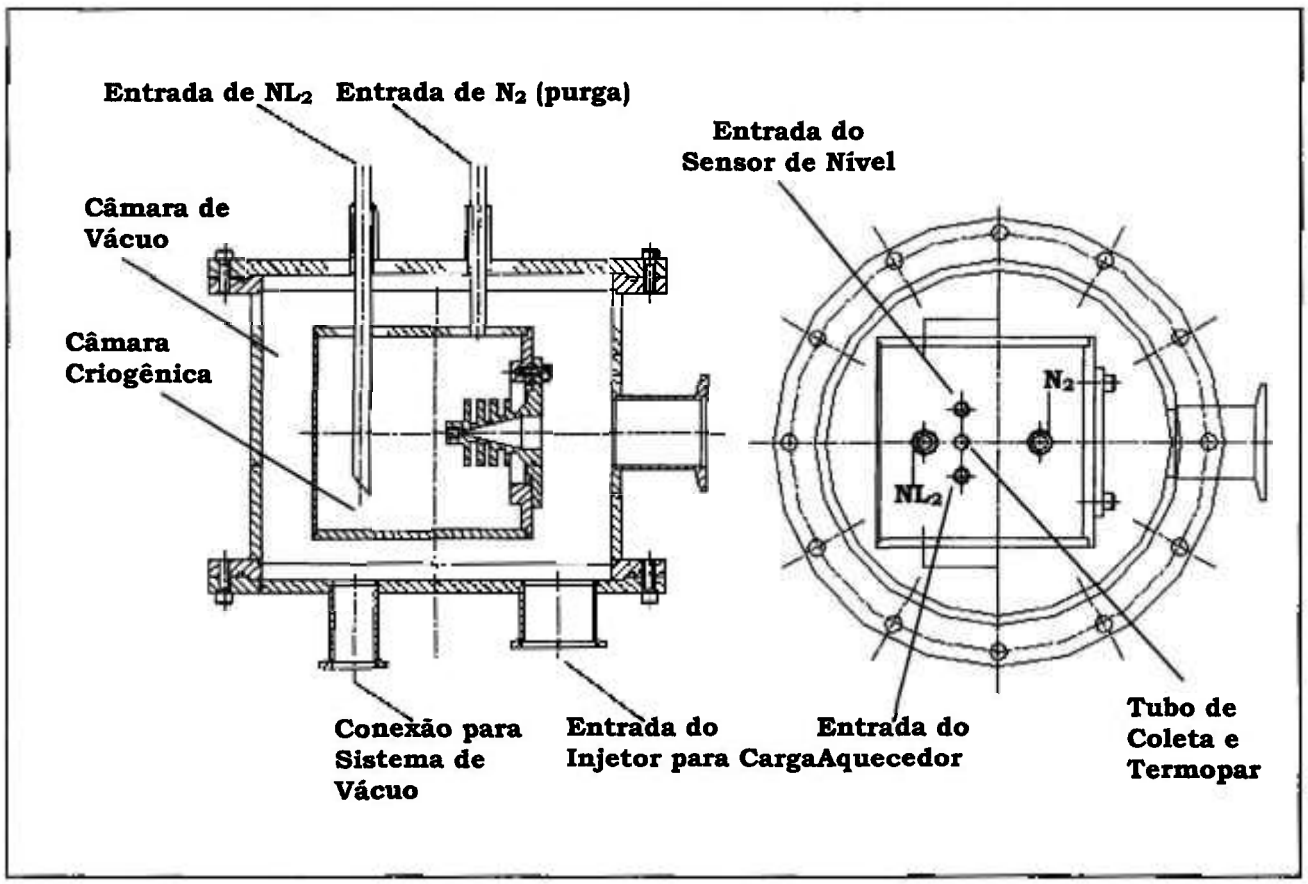


Figura 3.15: Esquema da câmara de isolamento e acoplamento do porta-alvo criogênico.

Para o carregamento do alvo foi desenvolvido um sistema injetor de pressurização de água em forma de *spray*, que permitiu a obtenção de um jato controlado de água. Um bico difusor (também projetado especialmente para este trabalho) fez com que o jato fosse bem espalhado. Este sistema tem uma agulha interna, ajustável, que controla a saída do líquido a ser irradiado. Este injetor está conectado em uma flange e acoplado em um motor, que permite o seu deslocamento, quando a etapa de carga é solicitada. O motor utilizado para avanço e recuo do injetor está acoplado a polias, sendo que em uma delas está preso o eixo do injetor. A parte interna deste eixo contém a passagem da tubulação de água e ar. O injetor avança para a carregar o alvo e recua para que ele possa ser irradiado.

Para que o alvo seja coletado, o conjunto inteiro do porta-alvo sofre uma rotação de 90º. Para este fim, foi desenvolvido um dispositivo mecânico, que

inclui um fole e dois cilindros, com amortecedores e válvulas com controles de fluxo de ar. A utilização de dois cilindros pneumáticos evita qualquer movimento nas laterais. O desenho destes dispositivos pode ser visto na Figura 3.16.

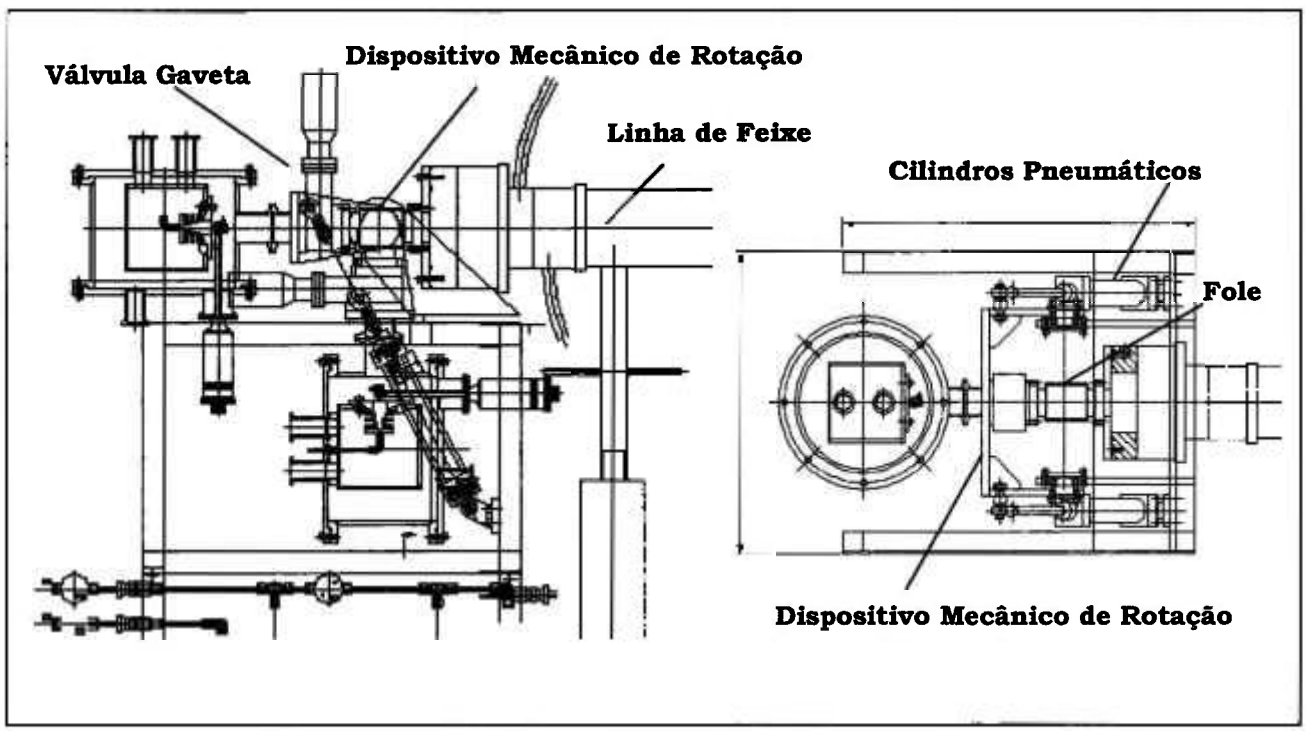


Figura 3.16: Dispositivo Mecânico de Rotação do Porta-Alvo Líquido.

Uma válvula gaveta foi ligada diretamente no porta-alvo, para ser fechada durante a coleta e manter este sistema isolado da linha de feixe do ciclotron e do fole de rotação. O uso de um cone invertido facilita a extração do material alvo depois da irradiação. Após a rotação, a câmara criogênica é purgada com Nitrogênio seco, o gelo é derretido e vai para o fundo do cone. O alvo, agora no estado líquido, é extraído com a ajuda de uma bomba peristáltica. Esta bomba foi utilizada, pois permite que a vazão do alvo seja controlada, além de se obter um bombeamento limpo (sem contato com o mecanismo da bomba), feito diretamente na tubulação, e possibilitando a utilização de pequenos volumes. Após a coleta, o sistema injetor é acionado e um fluxo de gás hélio passa por este porta-alvo para purgá-lo, retirando todo o resíduo de material.

3.4 DESCRIÇÃO DOS PROCEDIMENTOS USADOS NO PROCESSO DOS TRÊS PORTA-ALVOS

De uma maneira geral, para um alvo ser irradiado, as seguintes fases devem ser cumpridas:

a) Início do Ciclo

1. Pré-vácuo;
2. Refrigeração com água e/ou gás hélio;
3. Carregar Porta-Alvo com material a ser irradiado.

b) Irradiação

1. Abrir interface do Sistema de Irradiação com o cíclotron;
2. Controle de corrente de feixe no alvo;
3. Monitoração de vácuo;
4. Monitoração de temperatura e pressão.

c) Final do Ciclo

1. Desligar refrigeração;
2. Purga;
3. Ventilação;
4. Coletar o material irradiado;
5. Transportar o material irradiado para a célula de manipulação.

Mais especificamente, para cada tipo de porta-alvo o processo para controle deve possuir as seguintes fases:

a) Fases do processo para controle do alvo sólido

Procedimento: 1- Instalar porta-alvo na linha de feixe; 2- posicionar, por sucção, o alvo no porta-alvo; 3- travar o alvo; 4- fazer pré-vácuo; 5- circular água de refrigeração; 6- abrir válvula de feixe; 7– "IRRADIAR"; 8- desligar refrigeração; 9- purgar para retirada da água residual utilizada na refrigeração; 10- ventilar para quebrar vácuo; 11- soltar o alvo; 12- coletar o alvo em uma cápsula; 13- enviar alvo para a célula de manipulação.

O esquema da Figura 3.17 ilustra o processo para o controle do porta-alvo sólido.

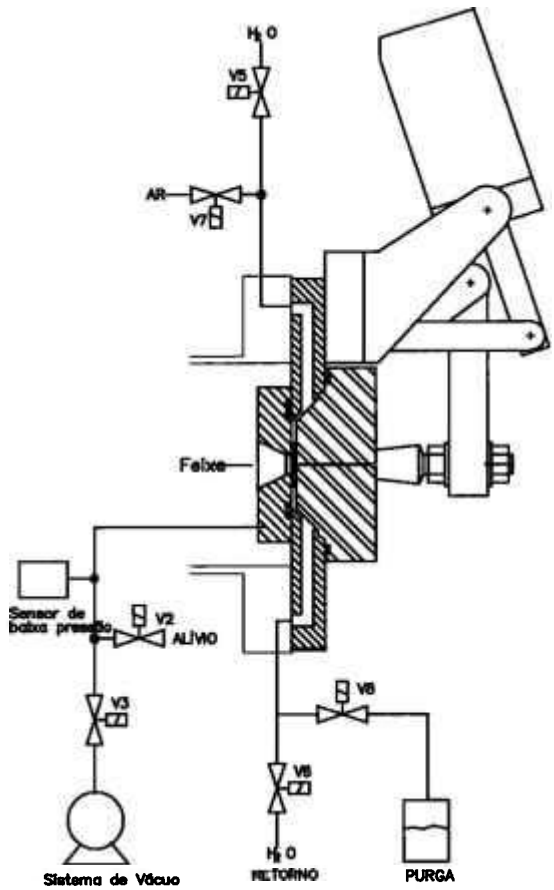


Figura 3.17: Processo de Controle do Porta-alvo Sólido.

b) Fases do processo para controle do alvo gasoso

Procedimento: 1- Fazer vácuo; 2- Refrigerar janelas com gás hélio e corpo do porta-alvo com água desmineralizada; 3- Carregar o alvo com o gás a ser irradiado; 4- "IRRADIAR", 5- Recuperação do gás alvo enriquecido via método criogênico; 6- Retirar produto radioativo isolado nas paredes do porta-alvo com a introdução de vapor; 7- Coletar a água condensada contendo o produto radioativo; 8- Transporte para a célula de manipulação.

O esquema da Figura 3.18 ilustra o processo para o controle do porta-alvo gasoso.

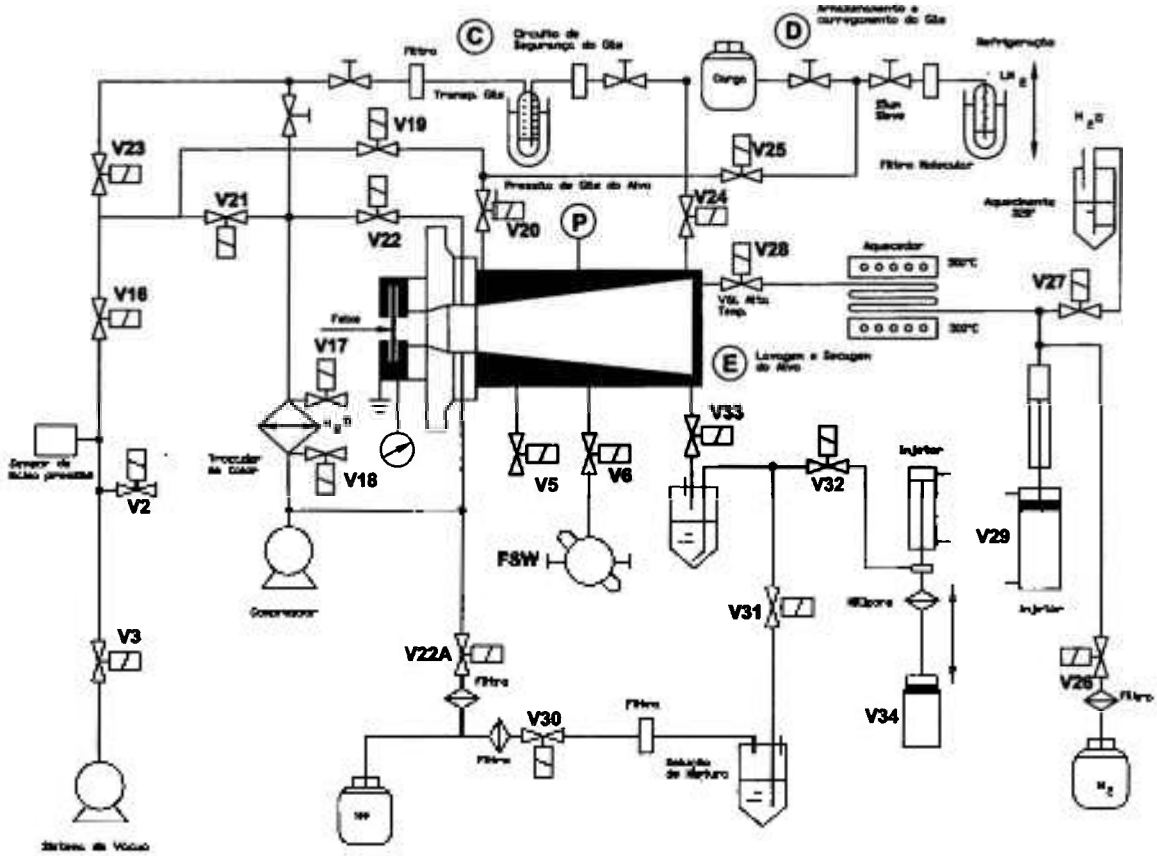


Figura 3.18: Processo de Controle do Porta-alvo Gasoso.

c) Fases do processo para controle do alvo líquido

Procedimento: 1- Fazer pré-vácuo na câmara criogênica e em seu encapsulamento (isolante térmico para o nitrogênio líquido); 2- Preencher câmara criogênica com nitrogênio líquido, para refrigerar e congelar o alvo; 3- Carregar o alvo com sistema injetor; 4- "IRRADIAR"; 5- Girar o porta-alvo em 90º; 6- Purgar o nitrogênio líquido; 7- Coletar o material irradiado com uma bomba peristáltica; 8- Transportar o alvo para a célula de manipulação.

O esquema da Figura 3.19 representa o processo de controle do porta-alvo liquido.

COMISSAO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP IPEN

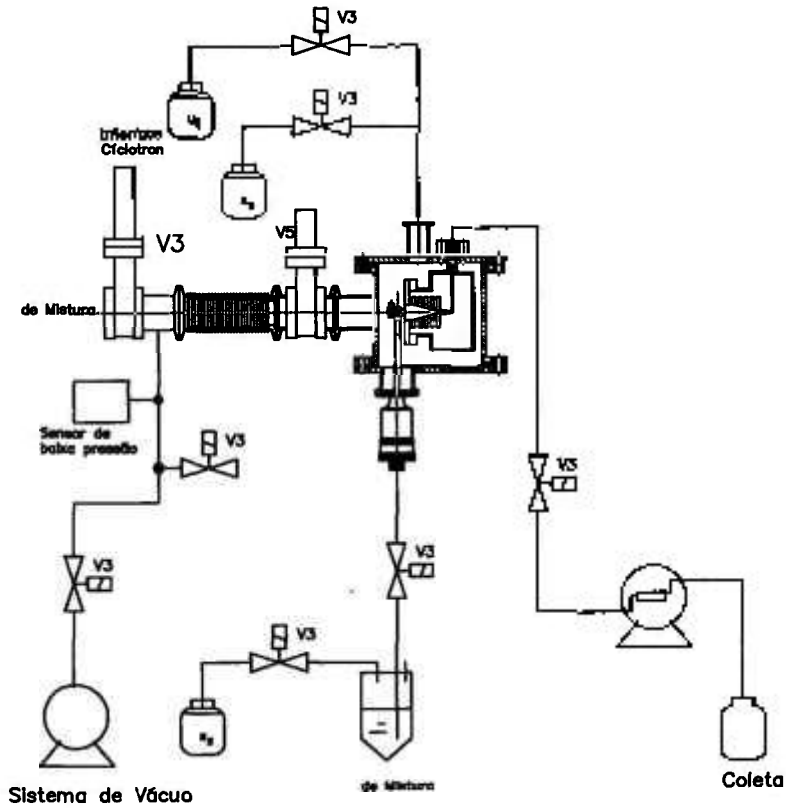


Figura 3.19: Processo de Controle do Porta-alvo Líquido.

3.5 AUTOMAÇÃO DO SISTEMA DE IRRADIAÇÃO DE ALVOS SÓLIDOS, LÍQUIDOS E GASOSOS.

3.5.1 Descrição do Sistema

Além da construção dos três porta-alvos, também foi confeccionado um Painel de Campo, que contém todos os elementos de operação, sendo responsáveis pelas atuações (válvulas, cilindros, etc.) e os elementos detecção (sensores), responsáveis pelo diálogo entre a operação e o controle. Para a parte de controle e supervisão, foi montado um Painel de Controle e foi desenvolvida a programação dos *Softwares* para controle dos processos.

Neste sistema, todas as operações são gerenciadas e supervisionadas em uma tela de computador, que se comunica com um CLP, o qual faz todo o controle do processo. Para estas etapas, foi necessário implantar sensores, para a realimentação de dados no sistema, tais como: níveis de fluídos, pressão, fluxo, temperatura, etc. Em cada etapa do processo, todos estes parâmetros são

monitorados e, além disto, há necessidade de atuação, quando qualquer anomalia nestes ciclos for identificada.

3.5.2 Desenvolvimento e Montagem do Sistema

O sistema como um todo, chamado de Sistema Integrado, é composto por Porta-alvos acoplados em uma pré-câmara na linha de feixe, um Painel de Campo onde está instalada toda a infra-estrutura de controle dos alvos e um Painel de Controle, onde é feito o gerenciamento e supervisão dos processos (a 30 metros do campo). A Figura 3.20 mostra o Diagrama de Blocos do Sistema Integrado utilizado no Desenvolvimento da Automação.

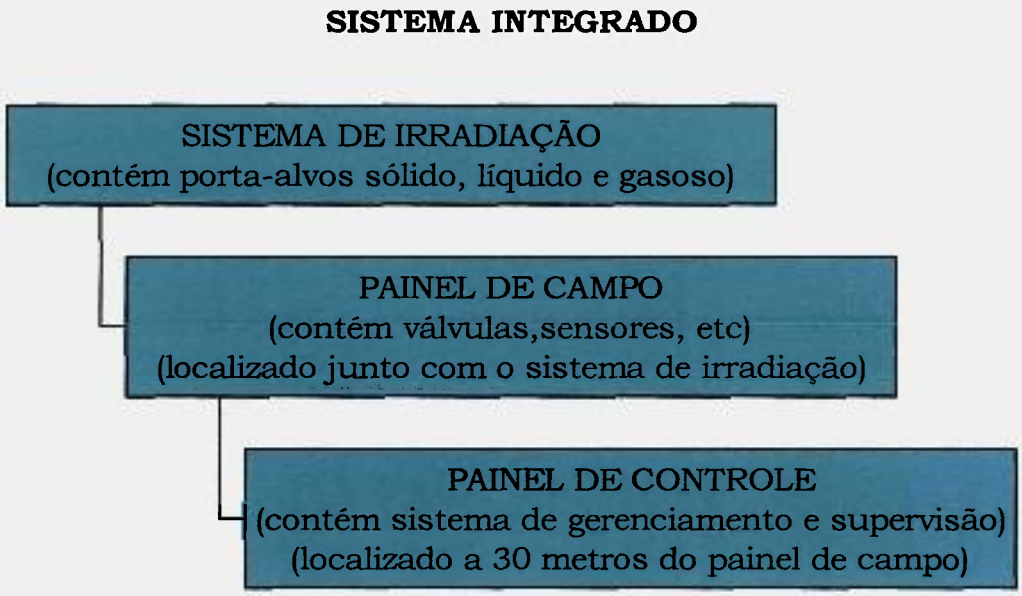


Figura 3.20: Diagrama de Blocos do Sistema Integrado utilizado no Desenvolvimento da Automação.

3.5.3 Arquitetura do Sistema de Automação

A arquitetura do sistema desenvolvido utiliza as mais modernas tecnologias e técnicas de controle existentes no mercado mundial. Nos últimos 10 anos, a concepção de sistemas de controle mudou radicalmente. Eles devem possuir não somente o controle físico do processo mas também proporcionar aos

usuários (operadores ou equipe de manutenção) informações intrínsecas ao controle, tornando os sistemas do tipo *user friendly*, altamente integrados.

Os equipamentos mais modernos são flexíveis, proporcionando rapidez nas mudanças ou melhorias do processo, com custo cada vez mais baixo. Outro fato importante nesta evolução foi a miniaturização dos equipamentos, de forma que sistemas altamente complexos necessitam pouco espaço para a sua instalação, facilitando muito a operação e manutenção.

A Interface Homem – Máquina (IHM), antigamente executada por sistemas do tipo mosaico de sinalização ou pelos antigos quadros sinóticos, hoje são ricos de informações e totalmente interativos com os usuários, desenvolvidos em microcomputadores e apresentados em monitores de vídeo de alta resolução e com informações digitais e analógicas atualizadas *online* [32, 72].

Seguindo esta linha, o sistema desenvolvido possui três dos quatro níveis (níveis 1, 2 e 3) da pirâmide universal dos sistemas de controle modernos, conforme mostra a Figura 3.21.

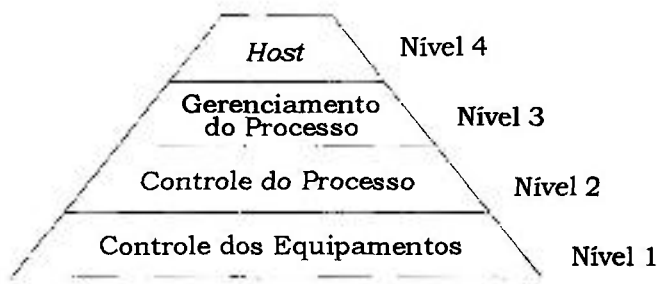


Figura 3.21: Pirâmide do Sistema de Automação[73,74].

Nível 1 – Controle dos Equipamentos

O controle dos equipamentos é compreendido por todos os elementos de controle instalados no campo (equipamentos eletromecânicos), necessários para o funcionamento deles. Os componentes utilizados se encontram entre os mais

modernos, no mercado mundial, e seguem os conceitos apresentados anteriormente.

Nível 2 – Controle de Processo

Este nível é o responsável pela parte operacional do controle de processo, onde os sinais recebidos pelos elementos de campo são avaliados e tratados por meio de uma lógica de controle do processo, gerando as saídas de controle e de dados.

Neste projeto, foi utilizado o CLP (Controlador Lógico Programável), um equipamento moderno e de elevada tecnologia, proporcionando alta flexibilidade. O CLP é um equipamento eletrônico que utiliza um conceito de processamento de informações por meio de um *Software* aplicativo, desenvolvido para o controle do processo. Permite, ainda, que o conceito de sistema de controle integrado seja usado no sentido mais completo. Ele executa o controle do processo, cria informações e dados, que são utilizados no sistema de gerenciamento, análise de informação e sistema de auxilio à manutenção. Módulos de entradas e saídas fazem a interface entre o CLP e os elementos de campo (Nível 1).

O *Software* aplicativo foi desenvolvido para executar todas as funções de operação e controle do processo, analisando-se as entradas de sinais do sistema e gerando as saídas e informações necessárias ao seu funcionamento. Neste desenvolvimento utilizaram-se várias ferramentas de alta tecnologia, com o objetivo de simplificar e/ou otimizar a parte operacional do processo e facilitar a manutenção do sistema. O detalhamento técnico destes pontos será abordado mais adiante, nos itens "Arquitetura do *Hardware*" e "Arquitetura do *Software*".

Nível 3 – Gerenciamento do Processo

Este nível foi desenvolvido com o objetivo de supervisionar e proporcionar aos operadores e equipe de manutenção a interface necessária para executar atividades de maneira simples e eficiente.

Por meio de um computador pessoal, foi desenvolvido um *Software* que disponibiliza, na tela do monitor, gráficos e interfaces, com os quais o operador pode interferir no processo de controle, modificando, selecionando, supervisionando e obtendo informações. Isto possibilita a integração do processo com outros sistemas, tais como, sistema de qualidade, sistema de manutenção preventiva e gerenciada a partir de relatórios estatísticos, sistemas de relatórios de eficiência e desempenho, sistema de rastreabilidade, ISO 9000, etc.

No sistema desenvolvido, foi utilizado um microcomputador e uma ferramenta de *Software* para desenvolver um sistema de gerenciamento, que atua na supervisão do controle do processo e do sistema de manutenção, o qual será detalhado nos itens "Arquitetura do *Hardware*" e "Arquitetura do *Software*".

Nível 4 – *Host* (Sistema de Gestão do Empreendimento)

Este nível, apesar de fazer parte da pirâmide de sistema de controle, não foi aplicado em nosso controle do processo. Porém, a arquitetura permite a sua implantação, sem muitos investimentos. No caso de radioisótopos produzidos em cíclotrons, uma vez desenvolvido, o processo de controle é experimentado em condições normais de produções rotineiras, podendo ser implementado para o fornecimento comercial do referido radioisótopo.

Todo o empreendimento possui duas áreas de controle. A primeira, operacional, onde estão todas as atividades produtivas e a segunda, administrativa, onde estão as atividades comerciais e financeiras. Este nível permite a integração destas duas áreas, de forma a vincular a produção às vendas, obter informações *online* sobre término e envio de produtos finais, integração com clientes, definir *mix* de produção, etc., e normalmente requer uma interface entre o nível 2 ou 3, com o computador central de uma determinada empresa, por meio de uma interligação via rede (ethernet, devicenet, tpi/ip ou outras).

3.5.3.1 Arquitetura do *Hardware*

Neste item, serão apresentadas todas as características e especificações de todo o *Hardware* utilizado neste projeto, de acordo com os níveis apresentados anteriormente.

A Figura 3.22 apresenta um diagrama esquemático com a Arquitetura de *Hardware,* dividida nos três níveis aplicados neste projeto.

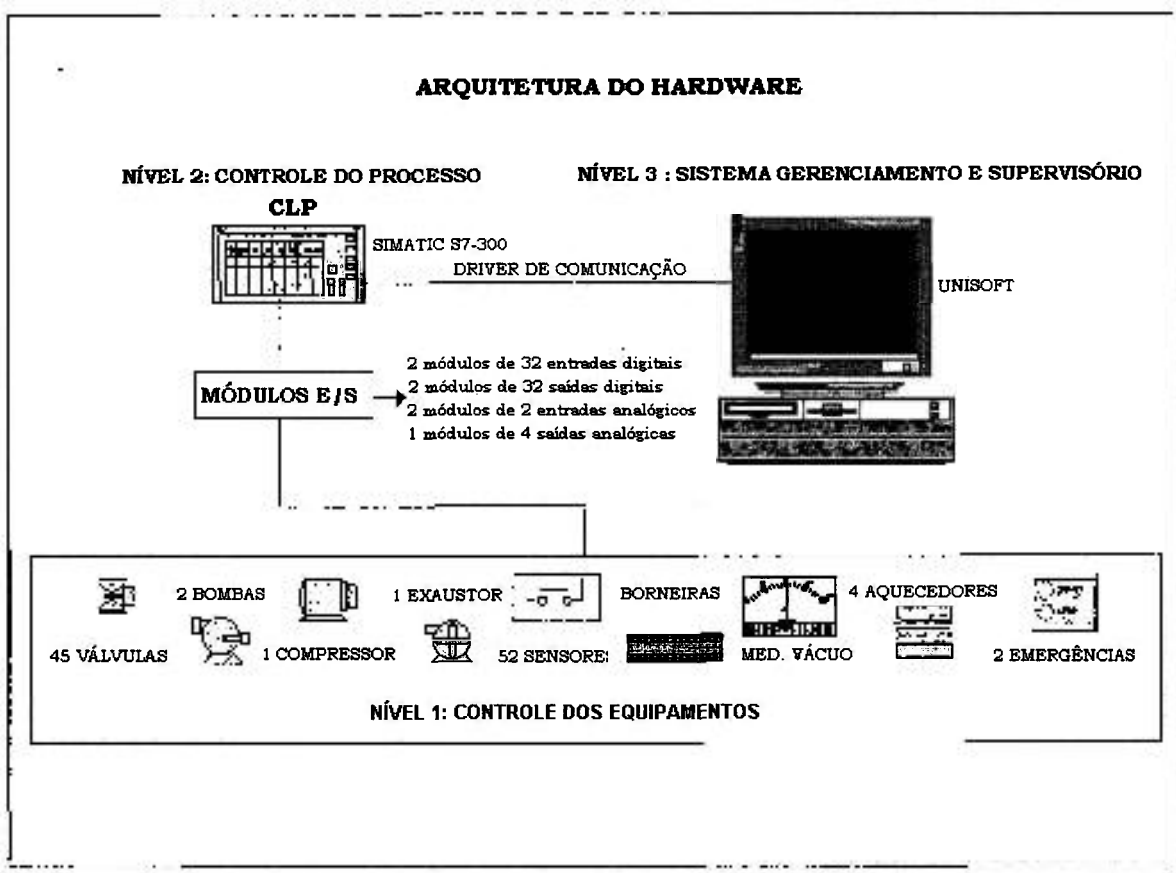


Figura 3.22: Arquitetura do *Hardware* com os três níveis aplicados neste projeto.

3.5.3.1.1 Arquitetura do *Hardware* – nível 1 (Controle dos Equipamentos)

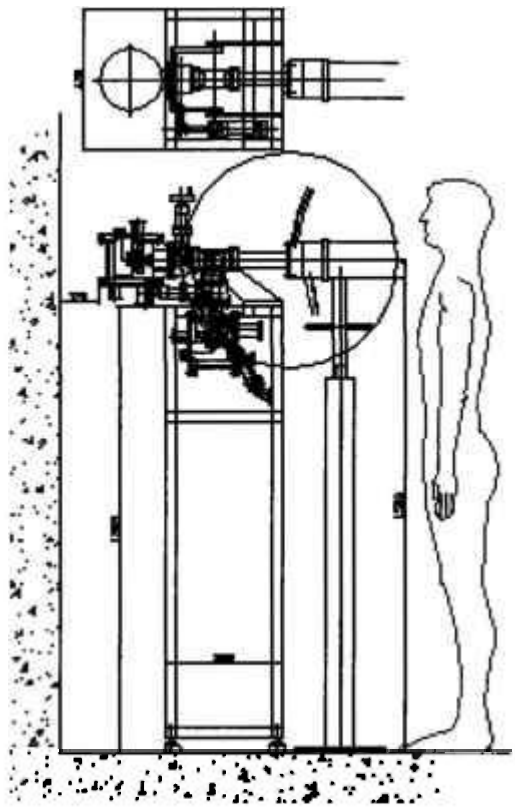
O *Hardware*, neste nível, é compreendido por todos os elementos de campo necessários para o controle dos processos dos três tipos de porta-alvos:

dispositivos pneumáticos, válvulas, controladores, filtros, reguladores, sensores, motores, bombas, etc. Para o desenvolvimento desta arquitetura, procuraram-se soluções visando a utilização de componentes que ocupassem o menor espaço possível, sem comprometer a confiabilidade e a operacionalidade, construindo-se um Painel de Campo, em uma estrutura de alumínio. Este Painel também serve como suporte dos porta-alvos na linha de feixe.

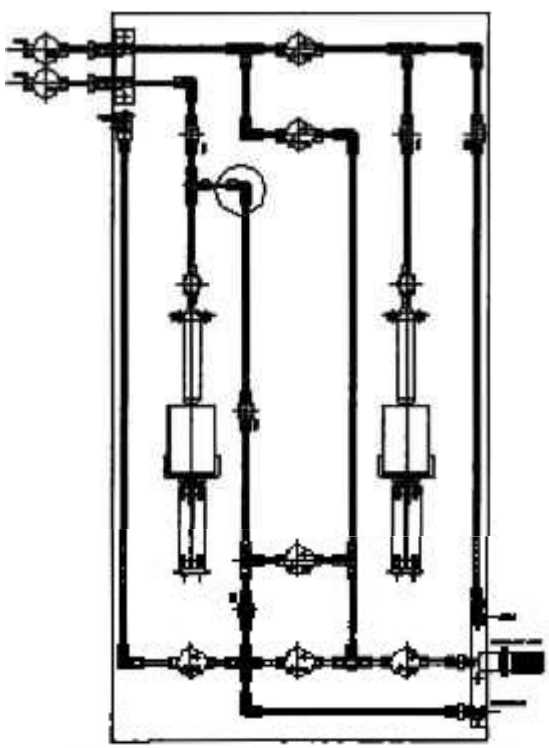
Todos os cuidados foram tomados na escolha dos componentes, de acordo com sua aplicação. Na seleção de sensores, por exemplo, foram adotados alguns critérios: verificou-se qual o tipo de chaveamento ou detecção mais adequado para cada aplicação, de acordo com as propriedades do objeto a ser detectado. Se o objeto é feito de metal, então um sensor de proximidade indutivo deve ser usado. Se o objeto é feito de plástico, papel, é um líquido (óleo ou água), é granulado ou é pó, então, um sensor capacitivo pode ser aplicado. Um sensor magnético é mais adequado para objetos (eletromagnéticos, imãs permanentes ou objetos ferromagnéticos), que podem comportar-se como magneto. Além disso, foram desenvolvidos alguns dispositivos especiais, por se tratar de componentes específicos. Exemplos que podem ser citados são o sistema tombador de coleta, sistema injetor e de carga do alvo líquido, entre outros que serão citados mais adiante.

O Painel de Campo é mostrado nos desenhos esquemáticos da Figura 3.23. Pode-se observar que, nas laterais, foram instaladas as válvulas e, na parte interna, as bombas. A parte superior, além de servir como suporte dos porta-alvos, foi utilizada para instalar o sistema tombador, para coleta do alvo líquido.

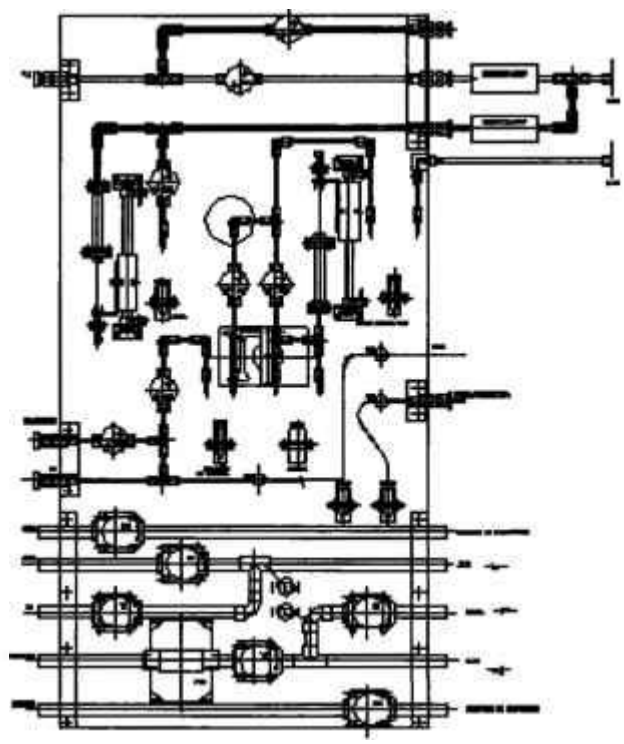
Todos os componentes que estão instalados no Painel de Campo recebem e estabelecem praticamente todos os pontos de entrada e saída digitais ou analógicos do CLP, necessários para a automação e controle do processo. Este Painel está interligado ao nível 2, pelas interfaces denominadas de módulos de entrada e saída.



ESTRUTURA DE ALUMÍNIO



PAINEL DE VÁLVULA - ESQUERDO



PAINEL DE VÁLVULA - DIREITO

Figura 3.23: Desenho esquemático do Painel de Campo.

Os dispositivos de Campo estão instalados em um "rack" móvel, para facilidade de transporte e manuseio. Construído em perfis de alumínio e fechados com placas suportes que possuem proteção eletrostática. Esta estrutura modular representa uma alternativa às estruturas convencionais rígidas, de aço, com elementos construtivos totalmente pré–montados. Ela tem estabilidade às vibrações e é completamente sem ruídos.

Nesta montagem, foram empregados componentes com grau de proteção anti-corrosiva, para diminuir os tempos de limpeza e aumentar a confiabilidade e vida útil deles, além da segurança dos processos. Produtos combinados, com soluções integradas e pré-montadas, foram utilizados, para otimização de espaços. A escolha do produto, qualidade, seu desempenho, baixo custo e a inovação tecnológica foram fatores importantes na montagem deste sistema.

Para controle de carga, vácuo, refrigeração com gás hélio e coleta para os três porta-alvos foram instaladas 23 válvulas Nupro *Swagelok*, interligadas com tubos de aço inoxidável. Para acionamento das válvulas e dos cilindros pneumáticos, foram utilizados três terminais de válvulas do tipo CPV, da *Festo*, que são válvulas de funções múltiplas e engloba válvulas 3/2 vias e 5/2 vias simples e duplo solenóide, num mesmo conjunto. Elas têm construção do tipo *sandwich*, possibilitando a ativação de 16 bobinas magnéticas e ou 8 válvulas de posições, para acionamentos dos cilindros. Permitem, ainda, uma rápida ampliação quando necessário. A alimentação de ar é feita pelas placas finais, em um único ponto. A indicação do estado de comutação é feita mediante LED integrado. Os sinais elétricos são enviados em um único cabo multipolar, que possui um conector com 25 pólos e tem internamente um circuito de proteção contra picos de tensão. Estas válvulas também possuem as seguintes características: economizam 90% de energia em relação às válvulas convencionais; são 80% mais leves e ocupam 1/3 do espaço de um terminal comum; utilizam menor tempo de montagem, economizando mão-de-obra de instalação; o terminal já é fornecido e montado com as conexões, válvulas e bobinas; resistem a jatos de água e poeira (IP65); proporcionam grandes vazões; eliminam conexões intermediárias e possibilitam instalações descentralizadas, próximas dos atuadores.

Neste Painel de Campo, toda a linha pneumática foi montada utilizando-se as conexões rápidas da linha *Quick Star*, que são conexões resistentes a faíscas, corrosão e ácidos. Ela oferece as condições ideais para realizar, rápida e facilmente, as instalações pneumáticas, desde a entrada até a saída, no menor espaço possível. Elas podem ser posicionadas em 360º, ao redor do eixo de sua conexão roscada, permitindo que a conexão possa ser girada em qualquer direção. Permitem a conexão rápida de mangueiras, que normalmente é trabalhosa e demanda um tempo muito grande, em montagens convencionais. Além destas facilidades, para conectar e desconectar mangueiras são eliminados anéis de vedação adicionais, sem redução na vazão, proporcionando uma grande segurança e confiabilidade. As mangueiras utilizadas para a linha de ar são de poliuretano, muito flexíveis, adequadas para raios de curvatura reduzidos e, também, para montagem por encaixe.

Na parte interna do Painel de Campo está instalado o sistema de vácuo, que controla os três porta-alvos. Este sistema é composto por uma bomba mecânica e duas válvulas do tipo PV25, todas da *Edwards* e várias outras válvulas Nupro (*Swagelok*), que são ativadas eletropneumaticamente e permitem a iniciação ou interrupção de vácuo nos porta-alvos. Sensores do tipo "Penning" e "Pirani", em conjunto com um medidor digital para vácuo, controlam diferentes etapas do processo, mediante envio de informação para o CLP.

A unidade de resfriamento com hélio é um sistema fechado e consiste de um compressor de diafragma, um trocador de calor e uma janela, com folha dupla em *Havar*. A pressão do gás hélio é cerca de 1 bar e a temperatura, em torno de 10ºC. Um sensor faz o controle do fluxo do gás neste sistema fechado.

Neste painel, foi montado o circuito de refrigeração de água, utilizando a água de circulação do cíclotron. A temperatura da água de refrigeração é monitorada e controlada para cada tipo de alvo. Para os sistemas de refrigeração foram utilizadas válvulas solenóides (*Asco*), com corpo de latão, que suportam pressões até 14kgf/cm^2 e o encapsulamento das bobinas é à prova d'água, de explosão e pó. Também foi utilizada uma chave de fluxo, para indicar qualquer anomalia na circulação da água. Termopares monitoram as temperaturas de refrigeração sendo os sinais enviados ao CLP.

Para o circuito de injeção de nitrogênio líquido, que alimenta dois *dewars* do porta-alvo gasoso e a câmara criogênica do porta-alvo líquido, foram utilizadas válvulas da *Asco*, especialmente projetadas para criogenia. Estas válvulas suportam temperaturas baixas como a do nitrogênio líquido (-196°C) e recebem um tratamento para torná-las livre de umidade ou de hidrocarbonetos. Suas principais aplicações vão desde combustíveis para mísseis ao congelamento de alimentos. O volume de nitrogênio líquido na câmara criogênica foi controlado por um sensor acoplado a um medidor e controlador de nível.

Para os controles de rotação do tombador para coleta do alvo líquido, controle das seringas do alvo gasoso e também para o acionamento dos *dewars* utilizados na carga, recuperação e emergência do porta-alvo gasoso, foram utilizados cilindros eletropneumáticos, com êmbolo magnético para a detecção, sem contato direto das posições finais e intermediárias do curso. Estes cilindros contêm amortecimentos internos reguláveis nas posições finais, permitindo maior freqüência de operação e, sensores instalados, com face na ranhura do perfil do cilindro, dispensando um conjunto de fixação adicional. Estas ranhuras têm coberturas que transformam as laterais dos cilindros em superfícies fechadas e também protegem os cabos dos sensores contra danos. Os sensores não ficam salientes.

Nos atuadores das seringas, foram utilizados cilindros pneumáticos sem haste, que oferecem uma boa solução para cursos longos ou quando há falta de espaço suficiente para a montagem de cilindros comuns.

Também foram instalados neste painel válvulas reguladoras de pressão, de precisão, acopladas com dreno automático integrado e com manômetro, filtros finos e ultrafinos, silenciadores e válvulas de retenção.

Neste Painel de Campo, as linhas de transferência do sistema de vácuo bem como as do circuito de refrigeração do gás hélio e do gás alvo, foram feitas com conexões e tubos de aço inoxidável. Os recipientes de coleta são de vidro e as tubulações de coleta são de plástico. Diferentes armadilhas foram usadas para a transferência de material. As garrafas de armazenamento de gás

consistem de pequenos cilindros (miniaturas) com volume de 50mL, em aço inoxidável.

3.5.3.1.2 Arquitetura do *Hardware* – nível 2 (Controle do Processo)

O *Hardware* utilizado neste sistema pertence à família de CLP *SIMATIC* da *Siemens*. O *SIMATIC* foi lançado pela *Siemens* em 1981 na sua versão *S-110U*. Era um CLP de pequeno porte, com recursos limitados, porém foi um grande avanço tecnológico para a época. Este CLP tinha a capacidade de controlar 128 pontos de Entrada/Saída (I/O), 32 contadores e 32 temporizadores, tendo 2K de memória RAM [75].

Com o desenvolvimento tecnológico em ritmo cada vez mais acelerado, mesmo após dezenove anos de constante evolução neste campo, o *SIMATIC* ainda é, em nível mundial, bastante utilizado nos diversos campos de aplicações, tanto em pesquisas em geral, como na indústria, sendo um sinônimo do nome Controlador Lógico Programável [76].

Com o objetivo de se manter nesta posição do mercado e, tendo a certeza, que seu sistema de CLP estará apto a absorver as mudanças que um futuro deve trazer, a *Siemens* ofereceu uma plataforma de um sistema completamente inovado, que é o *SIMATIC S7*. O CLP *SIMATIC S7* pode ser utilizado em vários processos:

- Controle de processo de *looping* fechado;
- Controle de processos de posicionamento;
- Controle de processos com análise proporcional, derivativo e integral com realimentação;
- Controle de válvulas, etc.

Por esta razão, optou-se pelo uso dos módulos denominados inteligentes, que são módulos microprocessados que executam, em tempo real, funções

especiais de modo independente e em paralelo a outras funções necessárias ao controle geral de um processo.

A família do *SIMATIC* oferece um conceito bastante atrativo de um dispositivo de programação, de baixo custo, comparado com as alternativas do mercado, que fazem uso de um microcomputador IBM compatível e utilizam sistema operacional *Windows 98* ou *NT*. No item "Configuração do Software" será detalhada esta ferramenta.

Neste trabalho, foi utilizado o *SIMATIC S7 - STEP7-300 (S7-300)*, que é um sistema "mini CLP modular", normalmente utilizado em sistemas de configuração de pequeno e médio porte, com uma variedade de módulos para adaptação em qualquer nível de automação e flexibilidade em sua aplicação. Isto se deve ao fato de que ele possui uma estrutura simplificada para implementações distribuídas e capacidade de conexão com diversos tipos de rede, utilizando o critério *user friendly*, o que torna seu uso bastante simples e não necessita de um alto nível de especialização em linguagens de *Software* ou análise de sistemas [76, 77].

Este "mini CLP modular" é normalmente utilizado em diversos processos industriais, a saber:

- Máquinas especiais de pequeno e médio porte;
- Máquinas têxteis;
- Máquinas de embalagem;
- Controle de máquinas de bens de capital;
- Ferramentas de máquinas de embalagem;
- Engenharia de instalações;
- Indústria eletro-eletrônica.

Ele foi projetado e construído conforme as seguintes normas nacionais e internacionais:

- *ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas*
- *NBR3 – Norma Brasileira №3*
- *DIN – Deutsches Institut Für Normung*
- *UL certificate – Unders Writers Laboratories Certificate*

- *CSA certificate – Chamber Shipping of America Certificate*
- *FM class 1 div. 2; grupo A, B, C e D (temperature group T4 (≤ 135 °C)*
- *ABS - American Bureau of Shipping*
- *Bureau Veritas*
- *Germanischer Lloyd*
- *Lloyds Register of Shipping*

O Sistema *CLP S7-300* utiliza uma unidade central de processamento (CPU), com configurações diferentes de tensão de alimentação, Módulos de Sinais (SM) onde contém os módulos de entradas e saídas analógicas e digitais, módulos de funções especiais denominados de FM's, processadores de comunicação via barramento, conexões ponto a ponto e interface, Módulo de Fonte de Alimentação (PS), Módulo de Interface(IM) para conectar ""rack"s" de expansão, Módulo de Memória (MSM), que é utilizado para arquivar o programa com segurança para o caso de falta de alimentação e ausência de bateria. A Figura 3.24 mostra o esquema do CLP *SIMATIC S7-300*, fabricado pela *Siemens* e aplicado neste projeto.

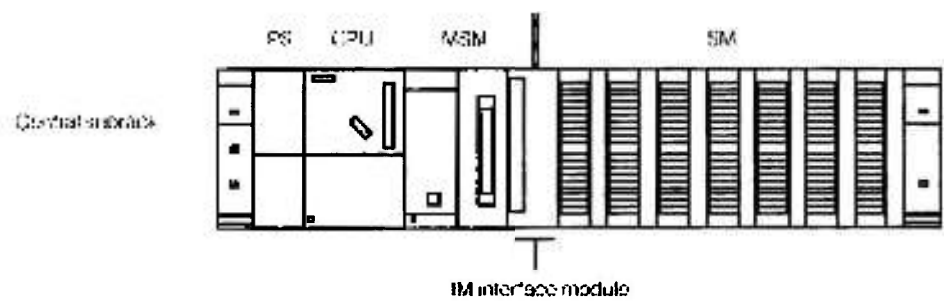


Figura 3.24: Esquema do CLP *SIMATIC S7-300*, da *Siemens*, aplicado neste projeto.

No controle do processo, foi escolhida a CPU 314, pois atendia a todos os requisistos, a saber: capacidade de memória, disponibilidade de funções, pontos de entradas e saídas, número de contadores e temporizadores, etc. A Tabela 3.3 mostra as especificações técnicas desta CPU.

Tabela 3.3 - Especificações Técnicas da CPU 314 [76].

Memória	
Memória de Trabalho (Integral)	24 kByte
Memória de Carga	
• Integral	40 kBytes RAM
• Expandida	4 MB FEPROM (Cartão de Memória)
Velocidade de Processamento	Aproximadamente 0,30 ms para cada 1000 bits de instrução
Bits de Memórias	2048
• Retentividade Ajustáveis	M 0.0 a M 255.7
• Pré-selecionados	M 0.0 a M 15
Contadores	64
Memórias de Relógio	8 (1 memória Byte)
Dados Locais	
• Total	1536 Bytes
• Por classe de Prioridade	256 Bytes
Entradas Digitais	512
Saídas Digitais	512
Entradas Analógicas	64
Saídas Analógicas	64
Entradas	I 0.0 a I 127.7
Saídas	Q 0.0 a Q 127.7
Tipos de Blocos	Números/tamanho máximo
• OB's (Blocos de Organização)	8kB
• FC's (Funções)	128/8kB
• FB's (Bloco de Funções)	128/8kB
• DB's (Blocos de Dados)	127 (DB0 reserva)/8kB
Funções	
Relógio de Tempo Real	Relógio do *Hardware*
Contador de Horas de Operação	1
• Número	0
• Variação do Valor	0 a 32767 horas
• Seletividade	1 hora
• Retentivo	Sim
Bateria de Back Up	
Tempo de duração a 25°C e uso ininterrupto da CPU	Mín. 1 ano
Tempo de armazenamento sem uso a 25°C	Aprox. 5 anos

Este CLP *SIMATIC* [77] foi instalado no Painel de Controle, localizado na sala de controle do cíclotron *CV-28*, a aproximadamente 30 metros de distância dos elementos do campo, isto é, dos sistemas de irradiação propriamente ditos. Neste painel, além do CLP (que controla o processo, com suas unidades de CPU e placas de entradas e saídas), estão instalados os dispositivos de proteção e potência dos elementos de campo, onde qualquer problema elétrico/controle pode ser corrigido na sala de controle, sem a necessidade do operador entrar na caverna, portanto, em uma área livre de radiação.

A configuração do *Hardware* neste nível 2, utilizado no sistema desenvolvido no trabalho e instalada neste Painel de Controle, abrange os seguintes componentes:

- Controlador Lógico Programável CLP, composto de:
    - CPU S7-300 cód. 314-6ES7 314-1AE04-0AB0.
    - Módulo de memória EPROM 64 KByte cód. 6ES7951-0KF00-0AA0.
    - Trilho para 9 slots cód. 6ES7 7390-1AE80-0AA0.
    - Fonte de Alimentação AC 120/130 Vac x 24Vdc 5A cód. 6ES7307-1EA00-0AA0.
    - Bateria cód. 6ES7971-1AA00-0AA0.
    - Dois módulos de 32 entradas digitais 24 Vdc cód. 6ES7321-1BL00.
    - Dois módulos de 32 saídas digitais 24 Vdc cód. 6ES7322-1BL00.
    - Dois módulos de 8 entradas analógicas cód. I/U 6ES7331-7KF01-A0B0.
    - Dois Módulos c/ 32 entradas digitais 24Vcc cód. 6ES7321-1BL00.
    - Fonte de alimentação filtrada DE 24VDC/5A.
- Disjuntor de entrada;
- Medidores de temperatura;
- Contatores, disjuntores termomagnéticos, para acionamento de motores;
- Botão de emergência;
- Contatores e fusíveis, para acionamento das válvulas;
- Bornes e conectores;
- Cabos de conexão;

Neste Painel estão incluídos os acionamentos para:

- Bomba e válvulas, para vácuo;
- Exaustor, para transporte do alvo sólido e bomba peristáltica, para transporte do alvo líquido;
- Motor compressor, para refrigeração com hélio;
- Posicionador/Injetor, para carregamento do porta-alvo líquido;
- Cilindros pneumáticos das seringas de coleta de material irradiado, utilizado no alvo gasoso;

- Válvulas de entrada, saída, purga de água e para carregamento do porta-alvo gasoso;
- Controladores de nível para nitrogênio líquido e controladores de potência, para aquecedores;
- Medidor e controlador de vácuo;
- Válvulas do *Beam Stopper*, interface do ciclotron, ventilação (para quebra de vácuo).

Mais especificamente, o Painel de Controle é um "rack" do tipo PC, compacto, confeccionado em uma peça única, com portas traseira e frontal. Possui recortes e luva para entrada de cabos, com *plug* do mouse e teclado. A parte inferior contém uma base soleira para entrada e saída de cabos. Permite fácil acesso à fiação, mediante suas portas. Neste "rack", também está instalado o Computador de Supervisão, que faz parte do item "Arquitetura do *Hardware* – nível 3 (Gerenciamento do Processo)". Neste gabinete, está interligada toda a linha de interface com Campo e Supervisão. Sendo assim, foram pesquisados recursos de montagem, procurando-se utilizar componentes integrados, visando sempre a economia de espaço e redução de custos de instalação. Todas as saídas para os elementos de campo possuem fusíveis de proteção, evitando-se danos maiores em caso de ocorrência de alguma anomalia.

3.5.3.1.3 Arquitetura do *Hardware* – nível 3 (Gerenciamento do Processo)

Para esta Arquitetura de *Hardware*, foi utilizado um computador com uma interface gráfica, sendo executada pelo sistema *Unisoft*, que tem como capacidade intrínseca a possibilidade de comunicação com outros dispositivos que atuam sob diferentes plataformas. Este tipo de interface permitiu que os tradicionais painéis das salas de controle fossem substituídos por equipamentos mais modernos, isto é, uma tela de computador no lugar de mesas de operação. Os computadores, além de efetuarem as mesmas tarefas, ainda, possibilitam uma concentração de dados, dispondo os operadores de forma mais clara e de fácil visualização.

O *Hardware* utilizado neste nível é um microcomputador IBM compatível, com a seguinte configuração:

- Processador Pentium III 450 MHz – *Intel*;
- 64 MB de Memória RAM;
- Drive Disk 3 ½" – 1.44 MB Formatável;
- Hard Disk – 4 GB – *Fujitsu*;
- Modem – *Motorola* SM 56 PCI *Speackerphone*;
- Kit Multi-mídia *ATAPI 45x*;
- Placa de Interface de Rede *SIMATIC* NET – CD 5011 (CPI);
- Monitor – Color SVGA 17" *LG*;
- Mouse – *Serial Standard*;
- Teclado – Standard 101/102 – *KEY BR*.

Este microcomputador está interligado ao CLP *SIMATIC* por meio da placa de interface serial *SIMATIC NET*, a qual tem a função de criar o meio de transmissão entre o *software* de supervisão e os dados do programa de aplicação do CLP. Estes dados são utilizados para informação *online* do andamento do processo ao operador.

Instalado em uma parte do Painel de Controle, o computador pode gerenciar os dados do processo pelo *Software* Supervisório. O Painel de Controle, que consiste de um "rack" do tipo PC, contém um painel de monitoração, com vidro de segurança abaulado, com pouca reflexão e alto grau de proteção, onde foi instalado o computador, que faz a supervisão do processo. Este "rack" conta, ainda, com uma gaveta retrátil e com fechamento para o teclado. Atrás do teclado articulado está integrada a caixa do *mouse*. A base do módulo, especialmente projetada para o monitor, é ajustável na altura. Uma das vantagens deste sistema é permitir a fácil visualização do monitor de supervisão, mesmo quando o "rack" está fechado, em virtude deste possuir uma tela de 17".

3.5.3.2 Arquitetura do Software

3.5.3.2.1 Arquitetura do *Software* – nível 2 (Controle do Processo)

O *Software STEP 7* é a ferramenta utilizada para configurar e programar o Controlador Lógico Programável *CLP SIMATIC S7-300* e pode ser usado em toda a fase de desenvolvimento da programação de um controle de processo, tais como:

- Configuração e controle;
- Configuração e pré-definição dos parâmetros de *Hardware* e meios de comunicação utilizados;
- Definição da simbologia utilizada;
- Criação da lógica de controle, chamado programa aplicativo do CLP (a lógica de funcionamento do processo);
- Meio de execução de *download* do programa do CLP, em um meio magnético ou vice-versa;
- Diagnóstico e teste do programa gerado;
- Diagnóstico de falhas.

Este *Software* foi elaborado dentro do conceito de estado da arte, em flexibilidade e facilidade de uso, possuindo as linguagens de representação *Ladder Logic*, lista de Instruções e Diagrama de Blocos de Funções, de modo que seus usuários não necessitem de maiores conhecimentos em linguagem de programação e informática em geral [78,79].

Ladder Logic – É uma representação gráfica da linguagem de programação *STEP 7*. Esta sintaxe, para as instruções, é similar a um diagrama de lógica a relés, altamente utilizado em comandos elétricos em geral. Por meio de uma linha de contatos, composta por botões, contatos auxiliares, sensores, etc., os elementos mais complexos, como, contadores ou temporizadores, blocos lógicos, quando verdadeiros, acionam saídas de controle do processo (válvulas, contatores, relés, sinaleiros, etc.). A Figura 3.25 mostra uma configuração típica da linguagem *Ladder*, correspondente a uma parte da etapa da carga do porta-alvo gasoso [80].

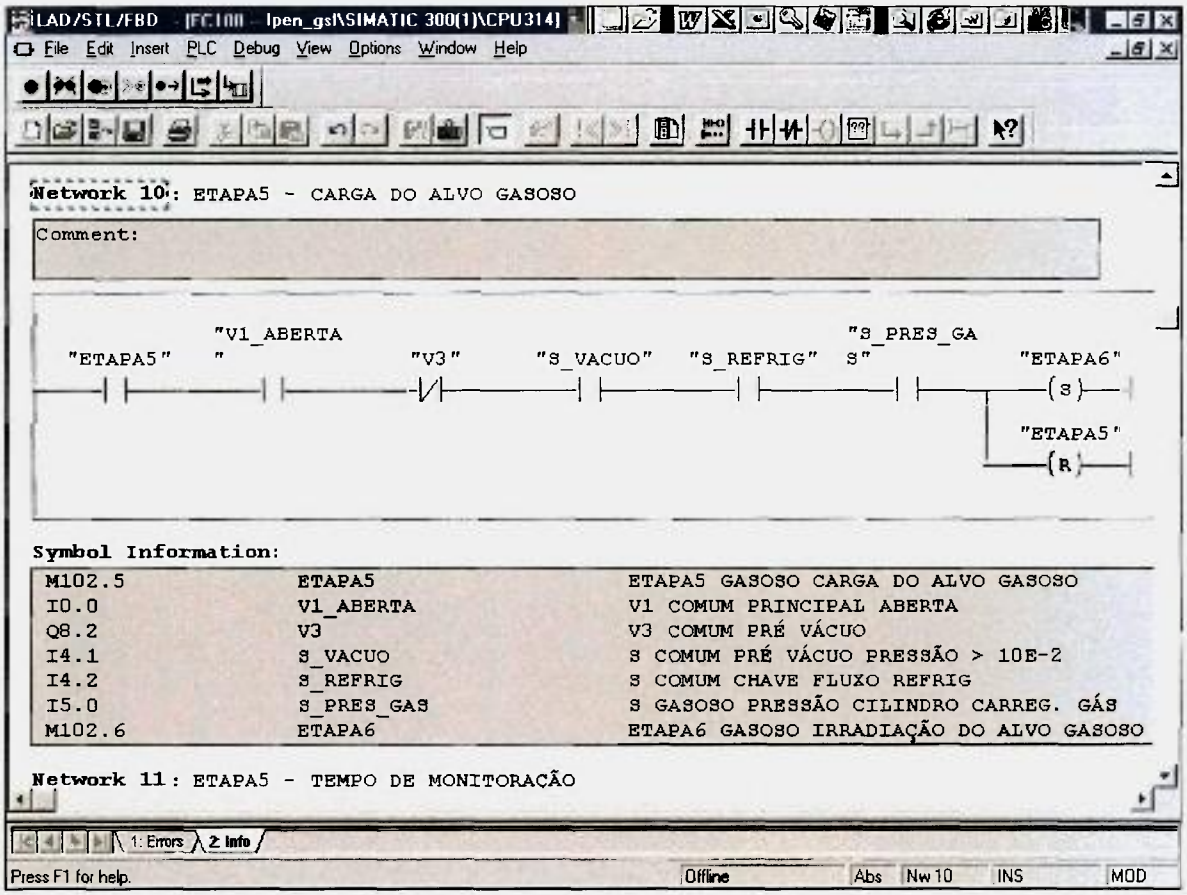


Figura 3.25: Exemplo de Configuração Típica da Linguagem *Ladder*, para parte da etapa da carga do porta-alvo gasoso.

Listas de Instruções – É uma representação, por texto, da linguagem de programação *STEP 7*. Esta sintaxe é similar a códigos de programação. Se um programa é escrito na linguagem "Lista de Comandos", as instruções individuais correspondem as etapas com as quais a CPU executa o programa. Porém, estas instruções são de alto nível, possibilitando, por meio de um único comando, realizar vários passos de programação, similar à linguagem de programação de 3ª geração. A Figura 3.26 mostra uma configuração típica da linguagem "Lista de Instruções", correspondente à mesma etapa (Figura 3.25), para efeito de comparação, com a linguagem *Ladder* [81].

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP IPEN

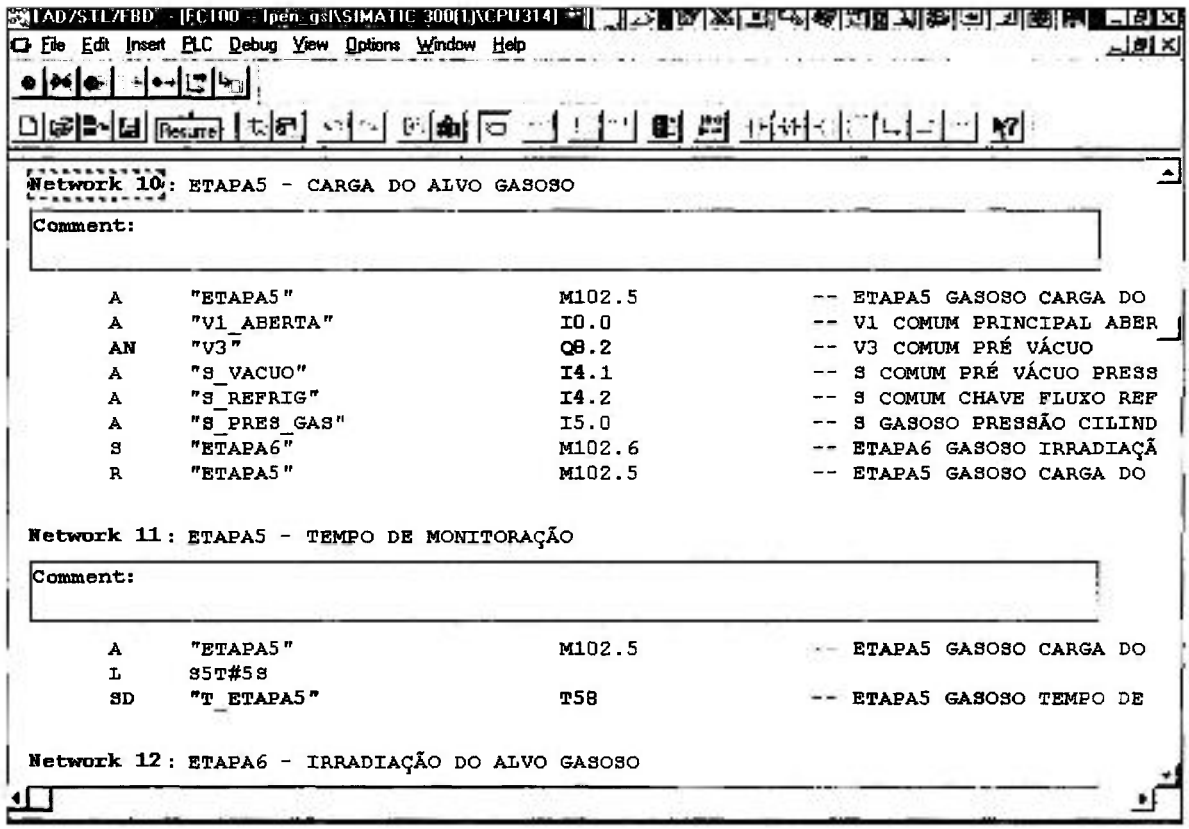


Figura 3.26: Exemplo de Configuração Típica da Lista de Instruções, para parte da etapa da carga do porta-alvo gasoso.

Diagrama de Blocos de Função – Também é uma representação gráfica da linguagem de programação *STEP 7*. Esta sintaxe utiliza blocos lógicos, similares aos utilizados em álgebra Booleana, para representar funções lógicas. É usada por profissionais de alta experiência em programação de CLP, uma vez que funções complexas podem ser representadas diretamente em conjunto com os blocos lógicos, otimizando o programa e tornando-o mais funcional, porém com menor compreensão para usuários com conhecimentos restritos na área. A Figura 3.27 mostra a configuração típica da linguagem de Diagrama de Blocos de Função, referente à mesma etapa da carga do alvo gasoso mostrada nas Figuras 3.25 e 3.26 [82].

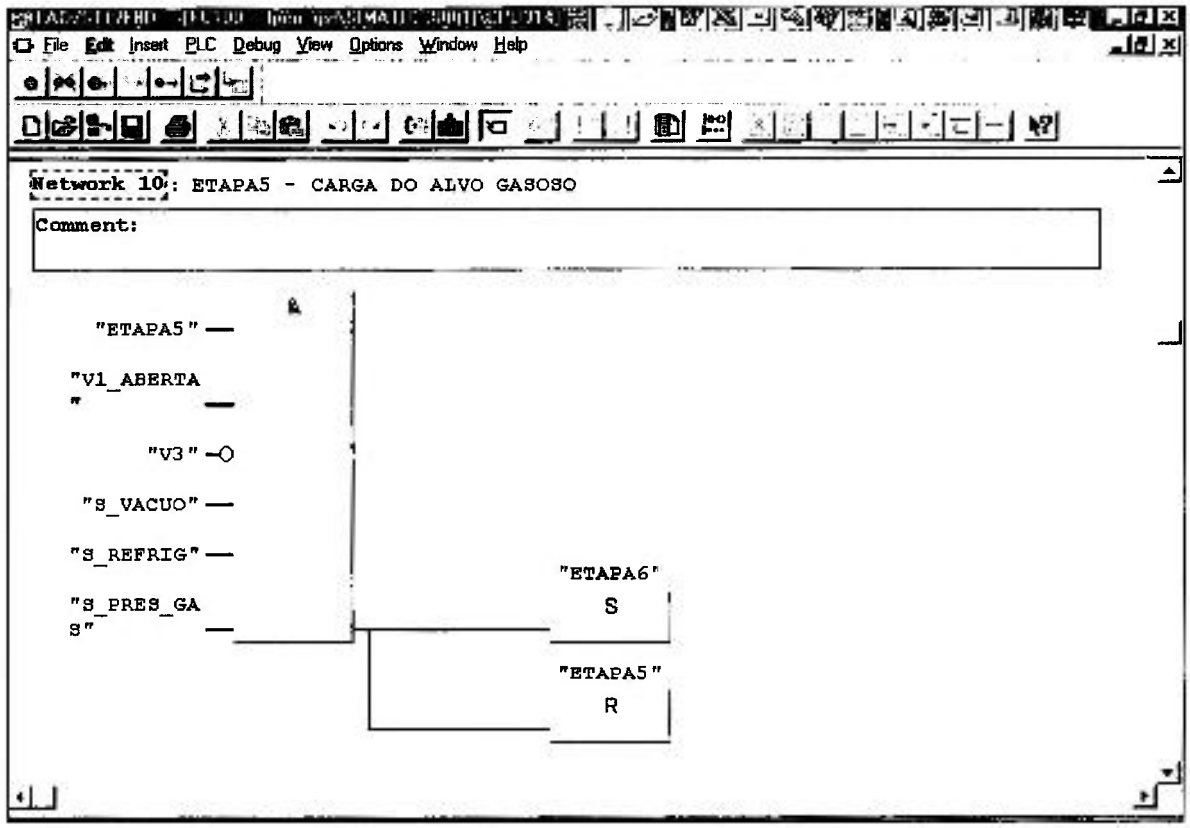


Figura 3.27: Configuração Típica do Diagrama de Blocos de Função, para parte da etapa da carga do porta-alvo gasoso.

Para a utilização desta ferramenta de programação, é necessário empregar um microcomputador pessoal, com processador Pentium, 16Mbytes de memória RAM, sendo o recomendável o de 32 Mbytes, com monitor colorido de 256 cores, teclado *standard* e *mouse*. O sistema operacional deve ser *Windows 9x, 2000* ou *NT*. Quanto à unidade de disco rígido, o pacote *STEP 7* ocupa de 70 a 100 Mbytes. O tamanho do disco rígido deve ser dimensionado de acordo com o sistema operacional, o *STEP 7* e outros *softwares* que se desejam instalar. A Programação do *Software*/CLP, para o Controle dos Processos, foi desenvolvido na linguagem de programação estruturada *Ladder*, utilizando o *Software* SIMATIC *S7*, da *SIEMENS*. O programa é comentado em português, incluindo a descrição dos elementos de comando e a função de cada linha de programa, visando facilitar a compreensão da lógica. Todo o *software* de controle do nível 2 foi desenvolvido e baseado nos diagramas de bloco, mostrados nas Figuras 3.28, 3.29, 3.30, respectivamente, que definem a operação dos 3 porta-alvos utilizados neste projeto.

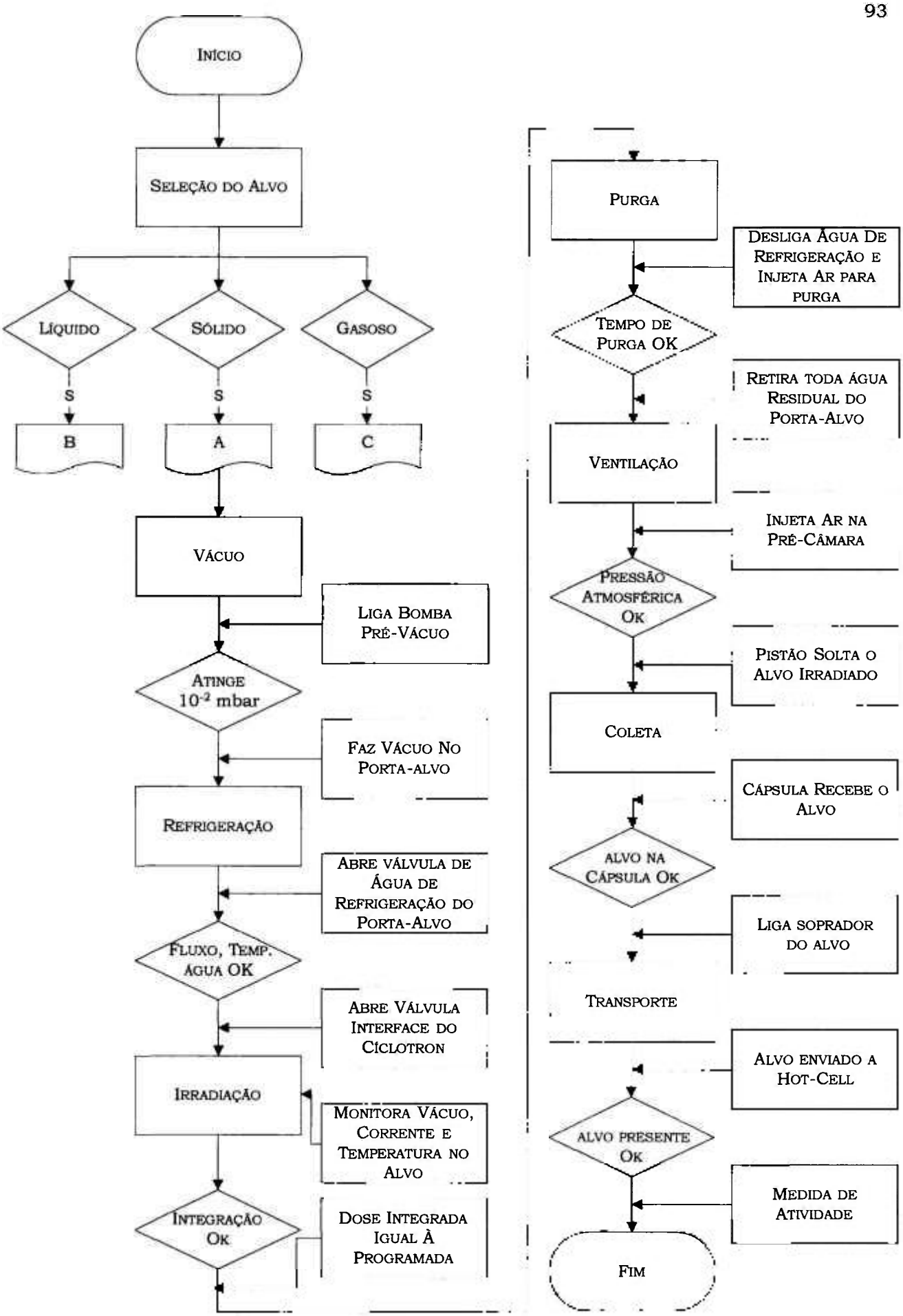


Figura 3.28: Diagrama de Bloco da Seqüência de Operação – Alvo Sólido.

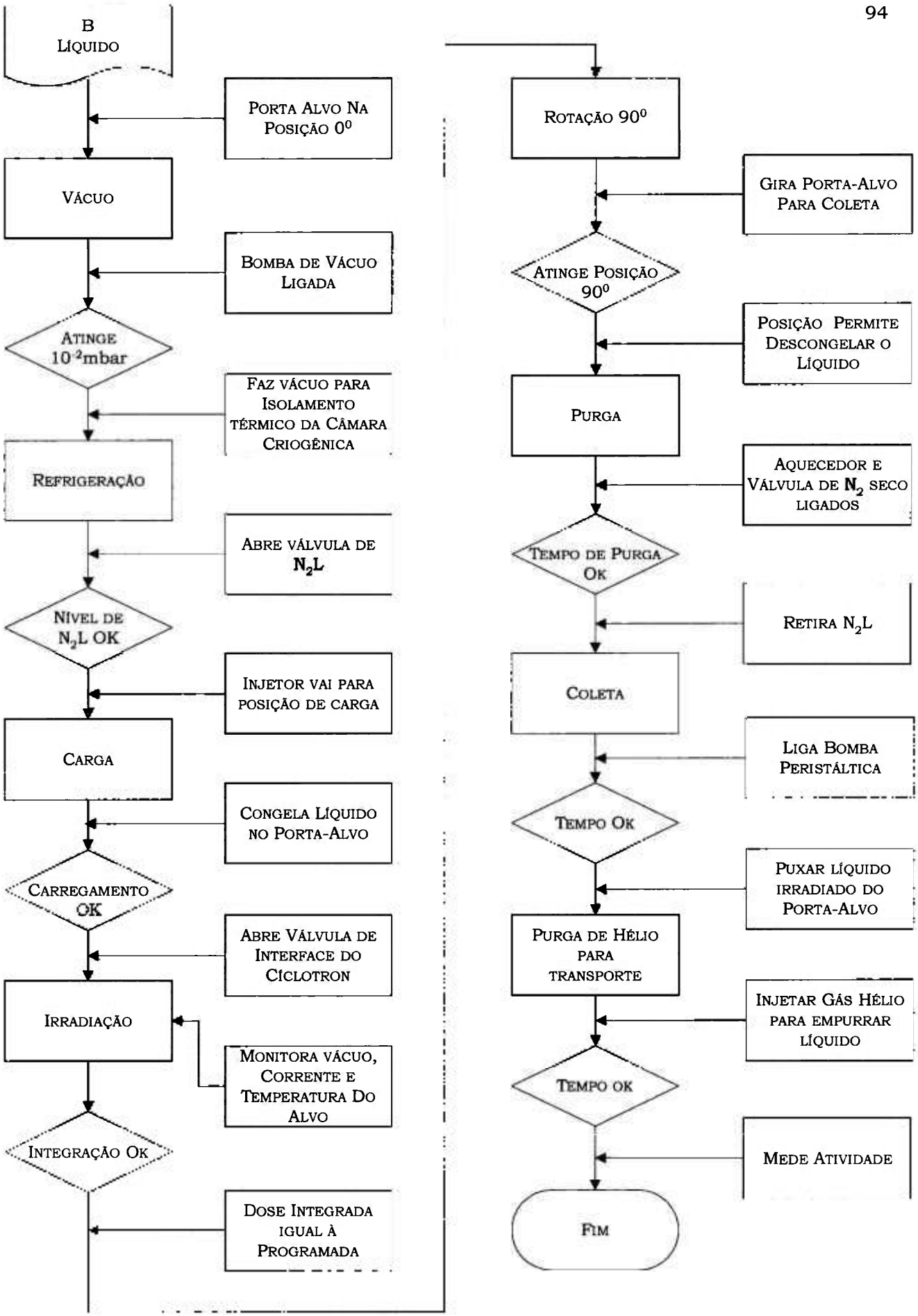


Figura 3.29: Diagrama de Bloco da Seqüência de Operação – Alvo Líquido.

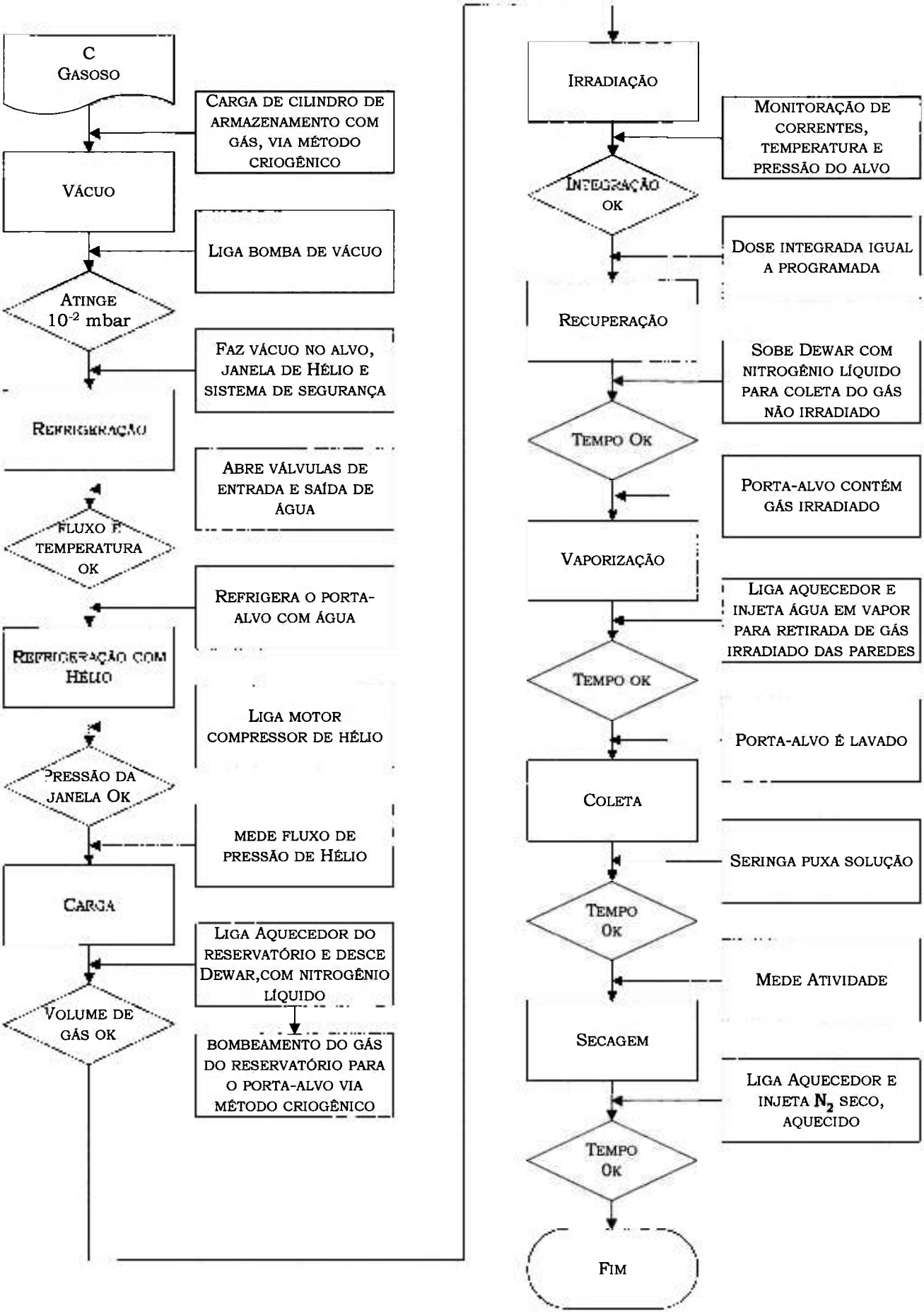


Figura 3.30: Diagrama de Bloco da Seqüência de Operação – Alvo Gasoso.

3.5.3.2.2 Arquitetura do *Software* – nível 3 (Gerenciamento do Processo)

Foram desenvolvidos o *Software* do Sistema Supervisório e a definição da lógica de funcionamento, para os respectivos processos dos alvos sólido, líquido e gasoso, conforme diagramas de bloco mostrados nas Figuras 3.28, 3.29 e 3.30, utilizando-se o *Software* aplicativo da *Unisoft*. Várias telas gráficas foram confeccionadas para os respectivos processos dos porta-alvos. Os recursos utilizados na construção delas são descritos a seguir.

O *Unisoft* é um poderoso e flexível *software* para automação de processos, permitindo criar aplicações em diversos segmentos:

- Aquisição de dados;
- Interface homem-máquina;
- Estações de supervisão local de processos industriais;
- Estações concentradoras de dados em processos distribuídos;
- Estações remotas de supervisão e operação;
- Integração de dados e comunicação com sistemas corporativos.

Ele utiliza microcomputadores e estações de trabalho, interligados em tempo real, a processos ou máquinas por meio de controladores programáveis, módulos de entrada e saída (I/O) ou outros equipamentos de aquisição de dados.

Normalmente, o sistema *Unisoft* não necessita de qualquer *hardware* proprietário específico para a aquisição de dados, podendo ser utilizados os dispositivos de entrada/saída (I/O) comuns (portas seriais e paralelas), mediante uma interface específica de *software* chamada de "Driver de Comunicação". Ele pode ser executado em qualquer tipo de computador, tendo como capacidade intrínseca a de poder se comunicar com outros dispositivos, que atuam sobre diferentes plataformas. O *Unisoft* gerencia a troca de dados entre dispositivos e tem a capacidade de adaptá-los adequadamente.

Possuindo versões para *Windows 9x/NT/2000*, o *software* da *Unisoft* permite a criação, desde interfaces de visualização de dados, até a integração completa de sistemas, com dados distribuídos em rede local.

O *Unisoft* fornece as funções necessárias para controle e supervisão de processos (*MMI – Man-Machine Interface* – interface homem máquina), assim como para armazenamento e aquisição de dados (*SCADA – Supervisory Control And Data Acquisition*), oferecendo, assim uma poderosa ferramenta para a automação de processos. É importante salientar que, o primeiro passo em automação é utilizar recursos técnicos e humanos da maneira mais eficiente possível. Os painéis tradicionais de Salas de Controle podem ser substituídos e/ou acrescentados por um computador e uma interface gráfica, sendo executada pelo sistema *Unisoft*, tendo a capacidade de monitoração, em tempo real, de todo o processo. Desta maneira, estão disponíveis poderosas ferramentas para a apresentação de dados em formatos gráficos, numéricos e tipo texto, de maneira muito acessível.

Além da funcionalidade esperada para um sistema completo de supervisão e controle de processos, o *Unisoft* tem várias características inovadoras. O Editor de Telas da *Unisoft* coloca à disposição do usuário diversas possibilidades [31]:

- Agrupamentos de objetos, preservando os passos de construção;
- Edição de componentes internos de objetos e grupos, sem desagrupar;
- Tratamento completo para inclusão de objetos e panos de fundo do tipo *bitmap;*
- Diversos tipos de janelas e diálogos;
- Suporte para inclusão de linha de status nas aplicações;
- Fácil inclusão de novos símbolos na Biblioteca, permitindo inclusão de objetos com qualquer tipo de propriedade dinâmica, em segundos.

A Figura 3.31 mostra uma Biblioteca de Símbolos, que serve como recurso para montar as telas gráficas de supervisão. Para escolher um símbolo, primeiramente seleciona-se o grupo ao qual ele pertence, no lado esquerdo da tela. Para posicioná-lo na tela do Aplicativo, basta simplesmente dar um clique na posição desejada.

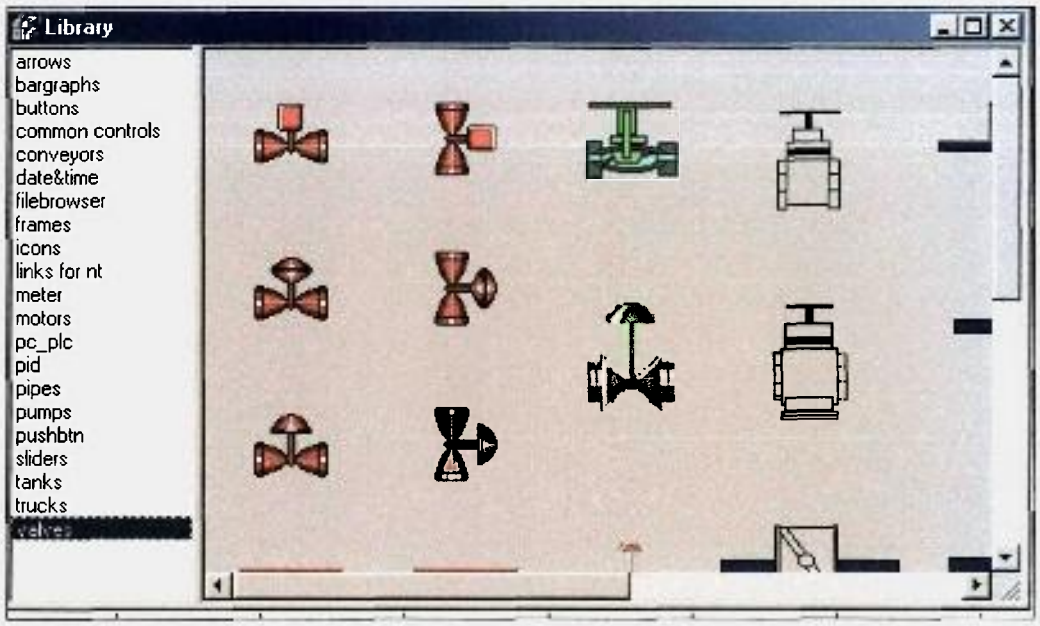


Figura 3.31: Biblioteca de Símbolos do *Unisoft*, mostrando um grupo de válvulas.

A Figura 3.32 mostra uma janela de construção e/ou desenvolvimento de telas (*Application Builder)*, onde pode ser visto um objeto selecionado: no caso, um tanque. Para a edição deste objeto, é necessário acessar o ícone da Biblioteca, clicar na seleção desejada da lista, que está do lado esquerdo desta janela e, com um duplo clique sobre o objeto selecionado, torna-se possível colocá-lo na grade de construção. Após este passo, o objeto pode ser ajustado em tamanho, cor e na dinâmica selecionada para ele, de acordo com a função desejada no processo.

Também, o *Unisoft* dispõe de uma linguagem interna de programação, que permite escrever as lógicas matemáticas para a aplicação. Além das mais de 90 funções já disponíveis, é possível adicionar funções personalizadas.

As tarefas de *runtime* aceitam novas configurações, imediatamente (configurações *online*), sem precisar reiniciar os programas. É possível mudar qualquer configuração, como cálculos matemáticos, relatórios, endereçamento no CLP e até mesmo o tipo de uma variável (*tag*) no banco de dados. O *Application Builder* possui o exclusivo *Execute mode,* que configura e executa na mesma janela, ao mesmo tempo.

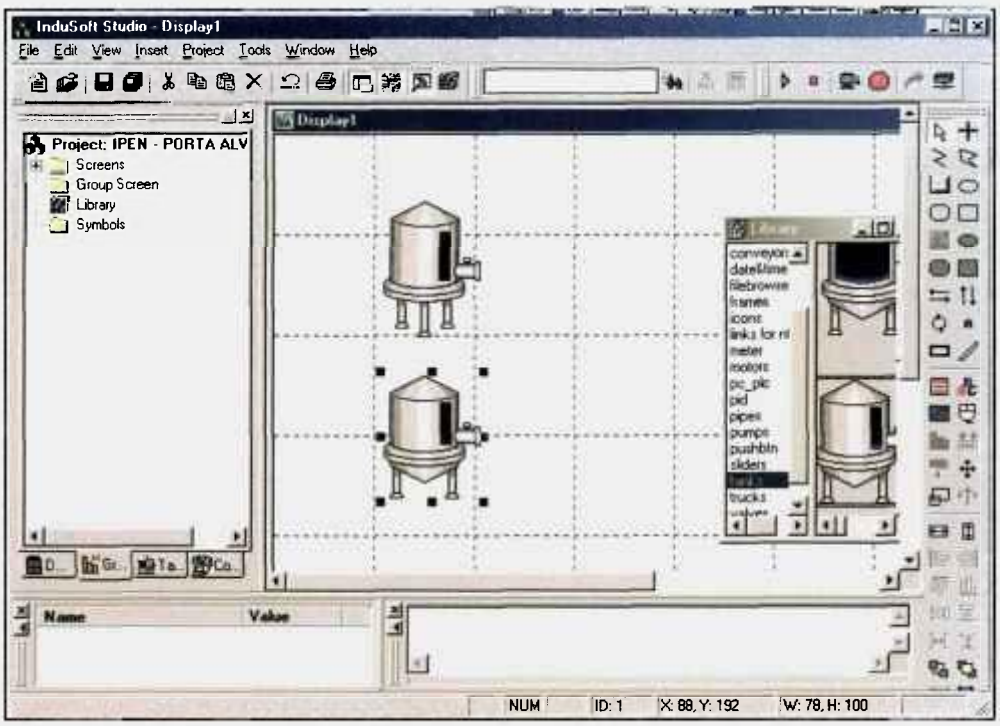


Figura 3.32: Biblioteca de Símbolos do *Unisoft*, mostrando uma janela de construção e/ou desenvolvimento de telas.

Com o *Unisoft*, podem ser impressos relatórios gráficos ou texto, e ainda, um arquivo pode ser gravado em disco. Todas as ferramentas necessárias para a criação de gráficos e relatórios estão disponíveis no próprio *software*, sem a necessidade de utilizar outros, como o *Excel* (no caso de criação de relatórios). O gráfico de tendência permite a monitoração, em tempo real, de varáveis envolvidas no processo. Esta seleção pode ser feita pelo usuário, enquanto o processo estiver em andamento ou após seu término, por meio de um histórico que fica na memória do computador.

Um sistema interno de segurança permite a criação de proteções, com grupos de usuários e senhas, não apenas para a execução da aplicação, mas também, para a utilização da ferramenta de desenvolvimento.

Os arquivos de históricos permitem salvar e recuperar os arquivos de dados dos eventos ocorridos, utilizando arquivos com base de tempo ou com nomes definidos pelo usuário.

O *Unisoft* permite o reconhecimento de eventos excepcionais, reportando-os imediatamente ao operador. As mensagens de alarmes podem ser formatadas livremente e permitem o uso de uma chave secundária de busca. Na configuração, os alarmes podem ser acessados por grupos ou por uma variável (*tag*). Os alarmes serão gerados nos limites de controle, que o sistema necessite, de acordo com a especificação do sistema. O *Unisoft* pode usar os alarmes de muitas maneiras, para notificar o operador, incluindo o registro da história dos eventos ocorridos ao longo do tempo. No *Unisoft*, pode ser configurada a comunicação de um alarme entre estações que compõem uma rede.

Além disso, o *Unisoft* possui ferramentas para auxílio no desenvolvimento de Aplicativos, como registros de mensagens, códigos de erro e eventos na execução da aplicação, acesso ao banco de dados e criação e verificação de variáveis.

Todos os módulos do *Unisoft* são desenvolvidos usando uma Biblioteca aberta (*UNIAPI - Unisoft Application Programming Interface*). Isto possibilita a expansão fácil e a capacidade de manter a evolução, tanto do *Kernel* (núcleo), quanto das tarefas de aplicação, independentemente. Além disso, permite ao usuário criar novos módulos para o *software*, a partir de qualquer linguagem com suporte para arquivos com extensão "DLL".

O *Unisoft* dispõe de um *Driver Toolkit*, que torna rápido e simples o desenvolvimento de *drivers* de comunicação.

Para o desenvolvimento das telas do sistema supervisório deste trabalho, foi utilizada a biblioteca de símbolos do próprio *Unisoft* e alguns desenhos foram criados, empregando-se ferramentas do AutoCAD e salvas como arquivos do tipo "*bitmap*".

Com a ferramenta *Unisoft*, também foi desenvolvido um sistema de aquisição de dados por meio de gráficos de tendências, usando-se códigos de cores diferenciadas, permitindo uma visualização do estado da variável, com informação *online,* ou caso necessário, pode-se levantar um histórico, de

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP IPEN

períodos anteriores ao que está em operação, pois ele fica registrado em uma memória. Estes gráficos estão disponíveis para impressão.

A ferramenta do *Unisoft* também proporcionou a confecção de um modelo de relatório, fornecendo ao operador a possibilidade de obter informações do sistema de irradiação, necessárias para o acompanhamento da produção.

3.6 TESTES OPERACIONAIS

Neste item são descritos os procedimentos para os testes, especificações e parâmetros diretamente relacionados aos equipamentos eletromecânicos de controle e do sistema de automação.

Todos os testes foram feitos, primeiramente, em Laboratório e posteriormente o Sistema Integrado (Sistema de Irradiação, Painel de Campo e Painel de Controle) foi instalado no cíclotron CV-28 do IPEN: o Painel de Campo e o Sistema de Irradiação na caverna, na linha de feixe nº 4, e o Painel de Controle, na Sala de Controle.

3.6.1 Testes Operacionais do Sistema de Automação

Estas operações foram feitas por partes, procurando-se manter um registro dos dados dos testes, para aprovar o desempenho dos equipamentos. Todos os testes foram realizados, primeiramente, em Laboratório, utilizando-se o material necessário para este procedimento:

- Fasímetro;
- Multímetro digital;
- Fonte de Tensão/Corrente;
- Ferramentas diversas; e
- Pacote completo dos desenhos elétricos e mecânicos.

Uma vez finalizada toda a montagem do Sistema Integrado, partiu-se para a realização dos seguintes testes, onde foi simulada toda a seqüência e lógica de

operação necessária para a irradiação de alvos:

- Testes de interligação do Painel de Campo com o Painel de Controle;
- Tensão aplicada na fiação;
- Teste de funcionamento elétrico e mecânico;
- Verificação da polaridade e dos instrumentos de medição;
- Verificação do funcionamento dos relés de proteção;
- Verificação da continuidade das ligações de saída;
- Verificação do sentido de rotação dos motores;
- Posicionamento de fim de cursos, tanto para chaves elétricas como para cilindros pneumáticos.

Também, foram feitos testes de funcionamento do Sistema Integrado, tais como:

- Teste funcional simulado;
- Ajuste dos elementos de campo (chaves fim de curso);
- Teste de funcionamento do sistema em vazio;
- Testes em vácuo, para verificação da estanqueidade do sistema;
- Teste de funcionamento com carga e de desempenho.

3.6.1.1 Testes em Vazio

Inicialmente, foi feita uma verificação visual na instalação em geral, observando-se a existência de conexões elétricas deficientes ou equipamentos danificados. Após a retirada de todos os fusíveis e serem desligados todos os disjuntores, foi feita alimentação geral trifásica de entrada do Painel de Controle com tensão de 220VAC, sendo medida a tensão de linha na entrada do sistema. A operação do sistema foi feita por partes, energizando-se a fiação equivalente a cada circuito, possibilitando, desta maneira, a correção de qualquer inversão que pudesse ter ocorrido durante a montagem. Os fusíveis foram recolocados também por partes, com seus respectivos valores ajustados, e os disjuntores foram acionados à medida que sua linha de comando era solicitada, para eventual correção ou ajuste. Durante a operação em cada parte todos os outros circuitos ficavam desabilitados.

Com o fasímetro, verificou-se a seqüência de fase no circuito, corrigindo-se no caso de inversão.

Uma fonte de corrente foi colocada nos sete pontos de entrada dos conversores de sinais analógicos, para eventual calibração.

Somente após a fiação ser acoplada e as botoeiras de emergência atuarem corretamente, o sistema foi energizado integralmente.

A simulação da seqüência lógica foi feita com o auxílio de uma ferramenta de monitoração e de modificação de variáveis do Software *SIMATIC*, forçando-se os sinais de entrada e verificando-se a saída. Este software também conta com um sistema de diagnóstico, que foi utilizado para detecção de erros.

3.6.1.2 Testes com Carga

Foi verificado o funcionamento manual e automático do sistema com a carga máxima exigida e o comportamento de todos os motores, movimento dos dispositivos de irradiação, etc. Após o término destes testes, o sistema pode ser considerado pronto para ser instalado no cíclotron.

3.6.2 Instalação do Sistema no Cíclotron CV-28

Após atender todas as normas e especificações, o Sistema Integrado foi instalado na caverna do cíclotron CV-28. Cabe salientar que, o objetivo do presente trabalho não foi o de obtenção de radioisótopos e/ou otimização em rendimentos de processo, que são de responsabilidade do *Centro de Radiofarmácia (CR)* do IPEN, e sim a automação dos sistemas de irradiação.

A opção de englobar os três tipos de alvos, principalmente o de tipo criogênico, se deu em função de desenvolver um sistema de automação o mais completo possível, abrangendo o maior número de etapas possíveis envolvidas.

Uma vez colocados os porta-alvos, todos os cabos de comando foram instalados entre o Painel de Campo, situado na caverna, e o Painel de Controle, situado na sala de comando.

Nesta fase, testes de simulação de corrente nos quatro setores, no colimador, no *beam stopper* e no alvo propriamente dito foram efetuados com fonte de corrente no sentido de verificar os valores indicados no monitor. Além disso, todas as ligações foram conferidas no sentido de verificar qualquer problema na fiação.

A instalação consistiu também de todas as ligações elétricas, de ar comprimido para os pistões e blocos de válvulas, água de refrigeração, gases, motores, etc. Uma vez instalados foram feitos os testes de vazamento de vácuo, testes de refrigeração com água onde foram verificados os retornos de sensores, como por exemplo: termopares, sensores de pressão, etc.

Os testes de estanqueidade, tanto dos porta-alvos como das tubulações, conexões e válvulas do Painel de Campo, foram realizados utilizando-se um Leak Detector da Edwards, verificando desta maneira, qualquer tipo de vazamento. Isto permitiu que fossem feitos os ajustes para sua correção.

3.6.3 Ensaios com os Porta-alvos

Conforme citado anteriormente, a obtenção comercial de radioisótopos não foi o objetivo do presente trabalho: assim, a lógica de funcionamento do sistema de irradiação e o seu funcionamento em si (carga do alvo, retirada, envio para o processamento, etc.) foram os fatores primordiais para testes de automação. Uma vez que o controle automatizado se comporte de forma a cumprir todos os requisitos necessários operacionais e de segurança a meta ora proposta pode ser considerada como concluída.

O alinhamento dos três porta-alvos com a linha de feixe foi feito utilizando-se filmes fotográficos (esta técnica normalmente é empregada neste tipo de verificação de incidência e centralização do feixe) com auxílio do sistema

de monitoração do feixe nos quatro setores e no colimador central.

Uma vez alinhados, isto é, corretamente posicionados, eliminados todos os possíveis vazamentos de vácuo, água e ar comprimido, toda a seqüência lógica para cada porta-alvo foi feita, tanto no modo de operação manual como no automático, em simulações completas de irradiações, onde foram provocadas situações de emergência e/ou anomalias, ensaiando-se, desta maneira, toda a automação desenvolvida.

As situações de emergências foram feitas injetando-se sinais fora da faixa preestabelecida, isto é, forçando-se e modificando-se valores de variáveis envolvidas no processo, de modo a provocar o reconhecimento destas situações pelo controle e as possíveis correções por meio das realimentações.

Os ensaios de simulações de irradiações, contendo toda a lógica de funcionamento para os porta-alvos sólidos, líquidos e gasosos, seguiram as seqüências apresentadas nos fluxogramas mostrados nas Figuras 3.28, 3.29, 3.30, respectivamente.

Apenas como ilustração, uma vez que os testes de simulação já demonstraram completamente a operacionalidade do sistema de automação, o alvo sólido, constituído de ^{nat}Zn eletrodepositado em placa de cobre niquelada (72x27)mm^2, com 500mg de massa de ^{nat}Zn eletrodepositado, foi submetido à irradiação com próton de 24MeV de energia e corrente de 10μA por uma hora.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CONFECÇÃO E MONTAGEM DOS PORTA-ALVOS

4.1.1 Porta-alvo para Irradiação de Alvos Sólidos

A Figura 4.1 mostra o porta-alvo sólido na sua forma final. Na Figura 4.1 à direita no canto superior pode ser vista a placa suporte onde o material alvo é eletrodepositado. Na Figura 4.1 inferior é visto o orifício de passagem do feixe.

Figura 4.1: Porta-alvo Sólido Confeccionado.

4.1.2 Porta-alvo para Irradiação de Alvos Gasosos

A Figura 4.2 mostra o porta-alvo gasoso na sua geometria final, conforme o projeto descrito no capítulo anterior. Na Figura 4.2 superior é destacada a confecção da flange suporte da janela de Havar, que foi utilizada para separar a câmara em alta pressão de gás do vácuo do cíclotron.

Figura 4.2: Porta-alvo Gasoso Confeccionado.

A Figura 4.3 mostra o sistema de carregamento, recuperação e emergência do gás. Pode-se observar o conjunto formado pelos *Dewars* (refrigerado com LN_2) e cilindros pneumáticos, que quando acionados, permitem o congelamento do mini reservatório de gás. Este resfriamento faz com que o gás seja bombeado criogenicamente. O gás fica armazenado no mini reservatório de aço inoxidável, com 50mL de volume, quantidade suficiente para realizar a carga do alvo. Quando esta etapa de carga é solicitada, o cilindro pneumático desce, retirando o *Dewar*. O mini reservatório de gás é aquecido por um elemento aquecedor, tornando-se possível a transferência completa do gás alvo. O mesmo procedimento é usado para o sistema de recuperação e emergência do gás. Este sistema foi desenvolvido para ser utilizado em irradiações de gás criptônio, mas é muito versátil, podendo ser adaptado e empregado com outros gases, na produção de outros radionuclídeos importantes para fins médicos.

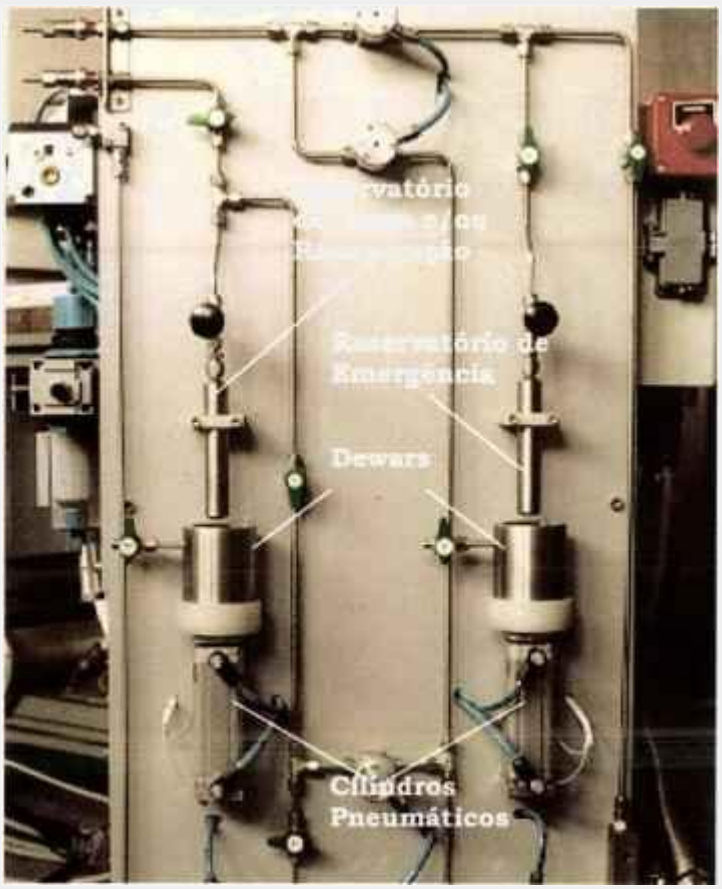


Figura 4.3: Sistema de Carregamento, Recuperação e Emergência do Gás Criptônio.

4.1.3 Porta-alvo para Irradiação de Alvos Líquido

O porta-alvo líquido confeccionado pode ser visto na Figura 4.4, na qual são mostradas a câmara do alvo, a sua parte frontal, a câmara criogênica e a câmara de vácuo.

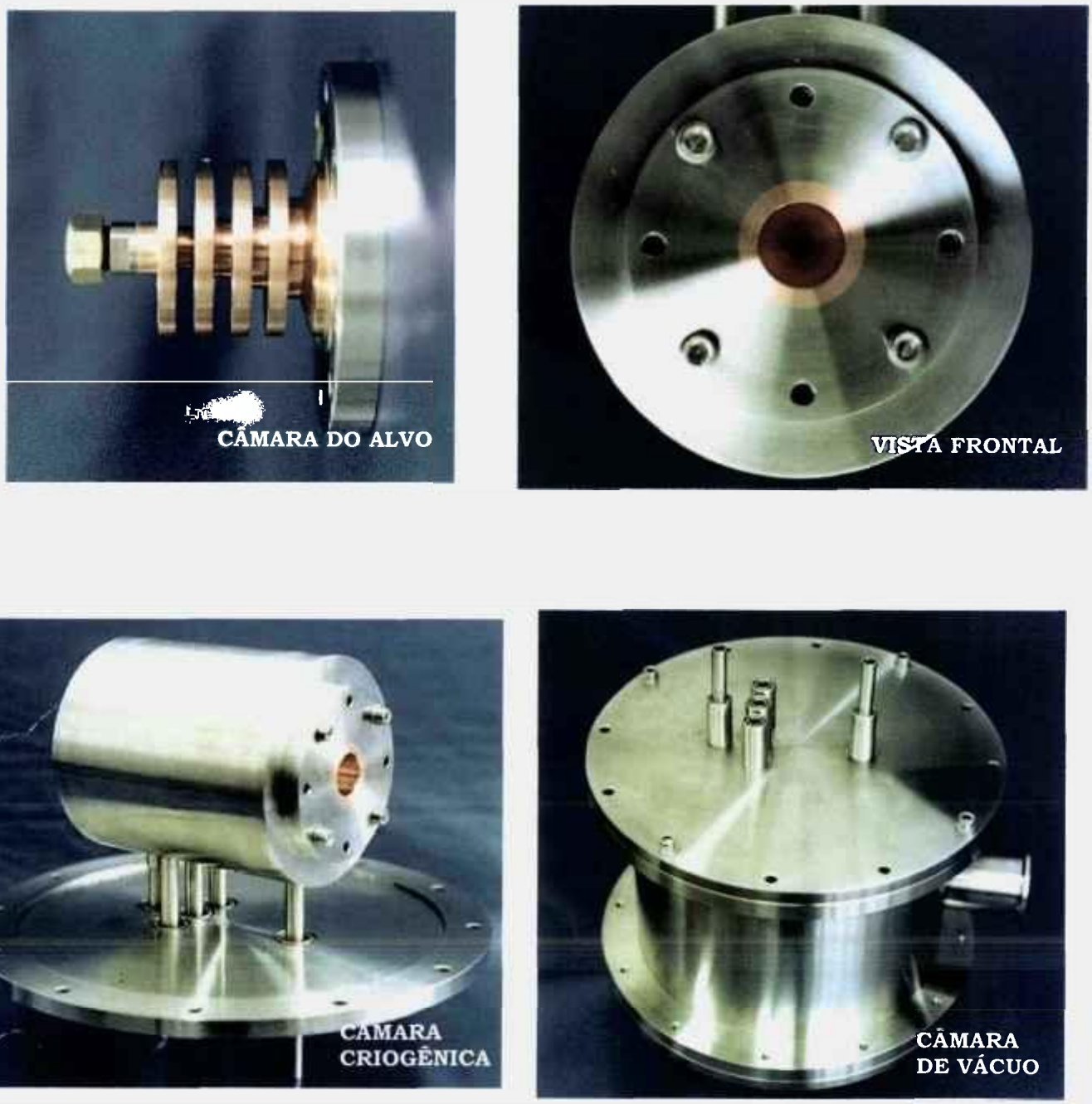


Figura 4.4: Porta-alvo Líquido (Criogênico) confeccionado.

O sistema injetor, utilizado para o carregamento do porta-alvo líquido, pode ser visto na Figura 4.5.

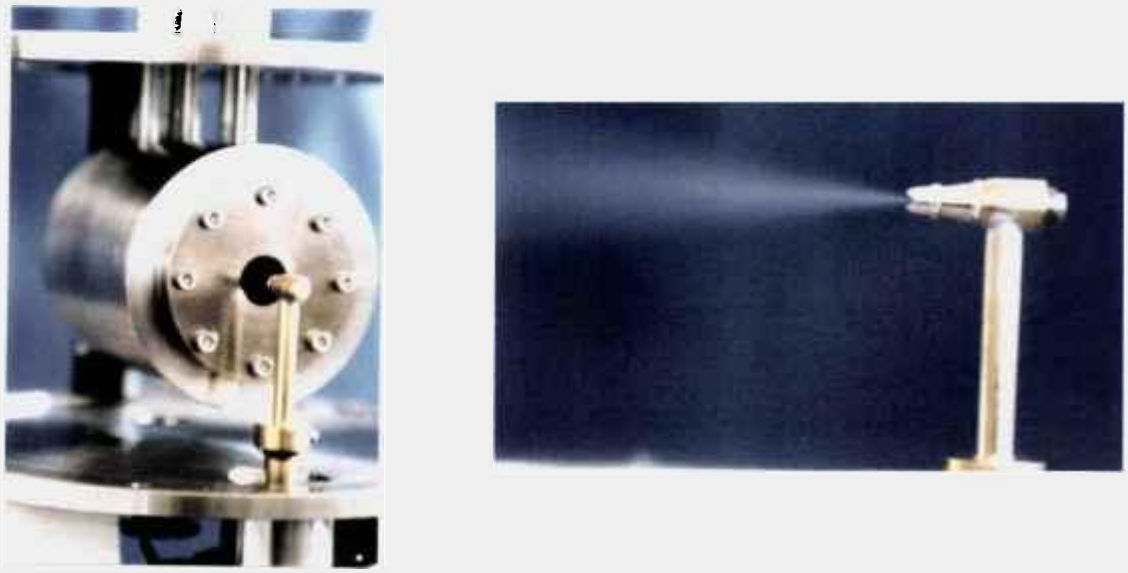


Figura 4.5: Sistema Injetor de Pressurização de Água em forma de Spray.

A Figura 4.6 mostra o sistema tombador, com seus respectivos dispositivos, utilizados na coleta do alvo líquido: câmara de vácuo, válvula gaveta, mecanismo e cilindros pneumáticos de rotação.

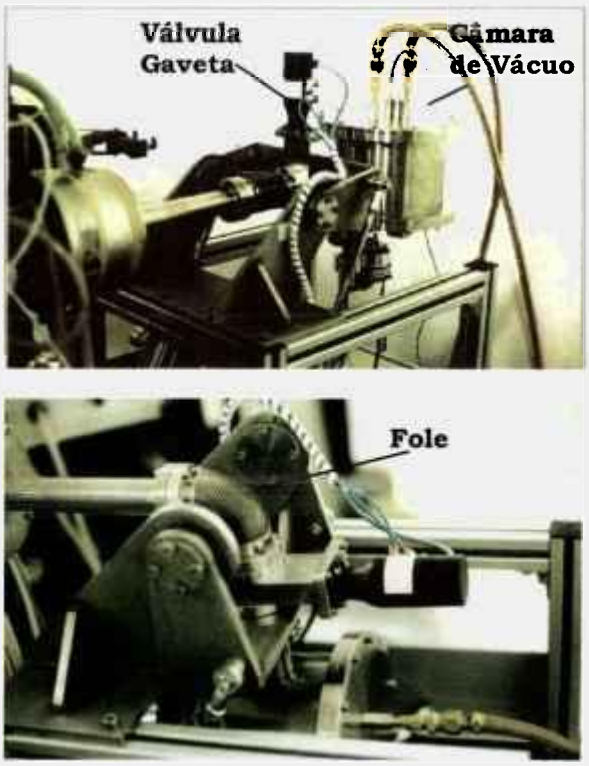


Figura 4.6: Dispositivo Mecânico para Rotação do Porta-alvo Líquido.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP IPEN

4.2 MONTAGEM E DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE AUTOMAÇÃO

4.2.1 Montagem do Hardware

4.2.1.1 Montagem do *Hardware*: Nível 1 – Controle dos Equipamentos

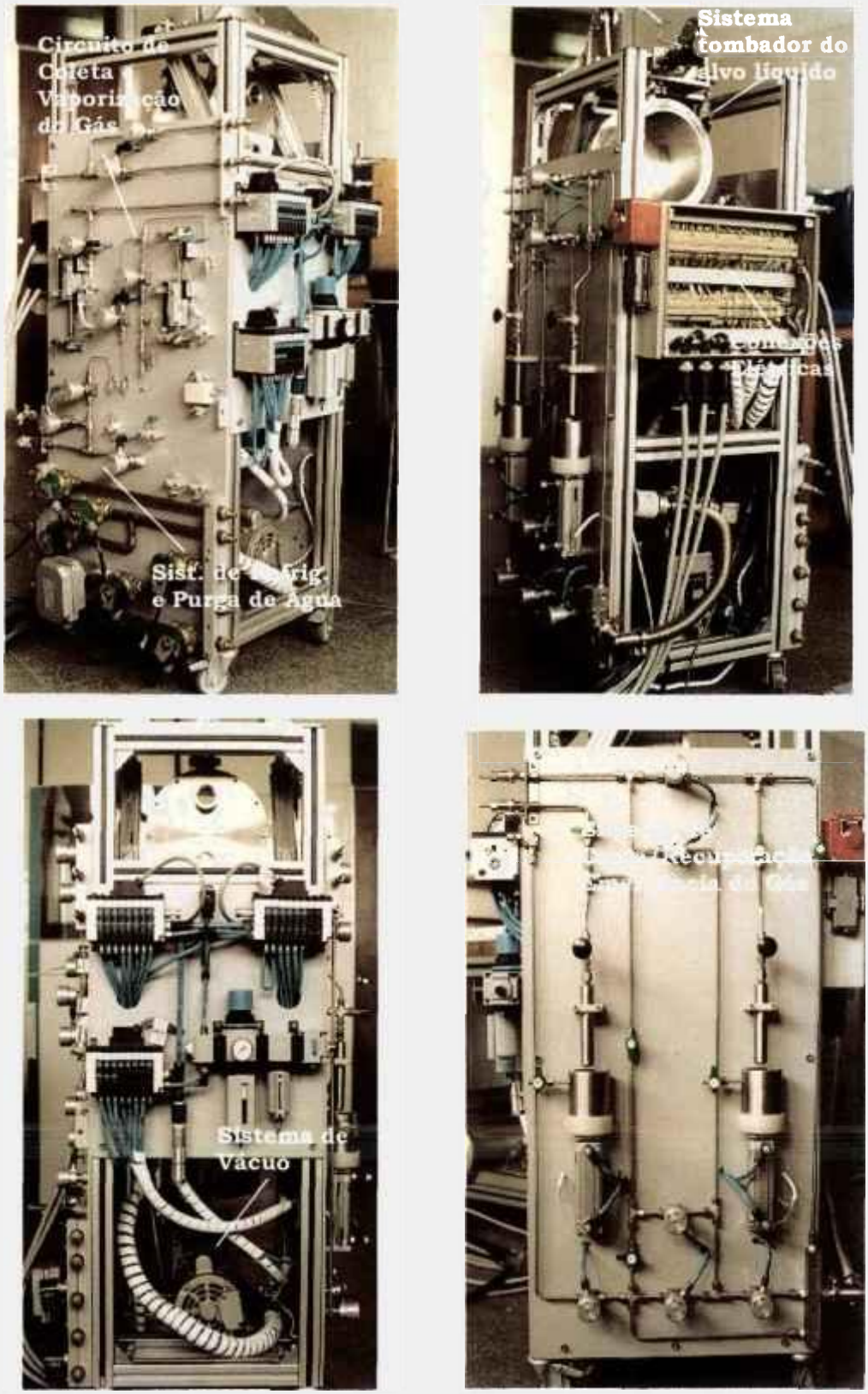


Figura 4.7: Vistas laterais, frontal e traseira do Painel de Campo.

Conforme pode ser notado na Figura 4.7, a montagem do *Hardware* foi feita de tal modo que se ocupasse o mínimo espaço possível na instalação dos componentes. Na Figura 4.7, podem ser vistos os seguintes sistemas: de vácuo, que foi instalado na parte interna do painel; de refrigeração e purga de água, com suas respectivas válvulas solenóides e chave de fluxo; tombador do alvo líquido; de recuperação/carga e emergência do alvo gasoso; de vaporização do porta-alvo gasoso; de coleta do alvo gasoso e líquido e de conexões elétricas.

A Figura 4.8 mostra em destaque os terminais de válvulas do tipo CPV, montados no Painel de Campo, que foram utilizados para acionamento das válvulas Nupro e dos cilindros pneumáticos. Cada bloco permite o acionamento de 16 válvulas comuns ou 8 cilindros pneumáticos.

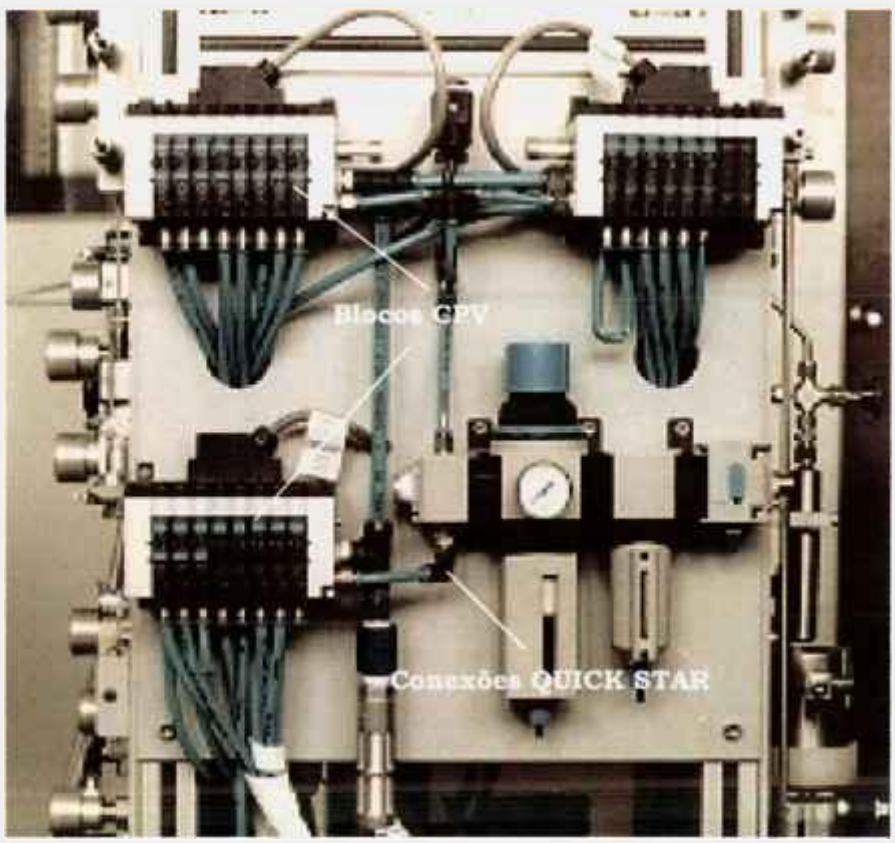


Figura 4.8: Terminais de Válvulas do Tipo CPV.

4.2.1.1 Montagem do *Hardware* – nível 2 (Controle do Processo)

Figura 4.9: Painel de Controle dos Sistemas de Irradiação de Alvos Sólidos Líquidos e Gasosos.

Conforme mostrado na Figura 4.9, foi feita a montagem do *Hardware*, onde pode-se destacar o CLP, os disjuntores de segurança e os conversores de corrente, instalados na parte frontal do Painel de Controle dos Sistemas de Irradiação de Alvos Sólidos, Líquidos e Gasosos. Na parte traseira, observam-se as barras de bornes, que fazem a interligação com o Painel de Campo.

Os seguintes pontos podem ser destacados para a instalação do *Hardware* de controle neste Painel:

- Toda a parte de controle, acionamento e supervisão está localizada em um painel único;
- Pode ser facilmente removido para manutenção;
- Toda a fiação está disposta em canaletas, conectada a bornes (além de bornes fusíveis e bornes relés), consistindo de uma instalação limpa com onde há identificação em todo o sistema onde facilita a manutenção;
- A utilização de bornes para interconexão de fiação e disjuntores e bornes fusíveis, para proteção do circuito, facilita a instalação e permite um ganho de espaço substancial;
- Utilização de mini-relés, projetados e fabricados de acordo com alta tecnologia em termos de redução de espaço e flexibilidade;
- Botões de Emergência interrompem o processo, quando aparece qualquer anomalia física, gerada por erro de operação de montagem da amostra. As demais anomalias param sem a interferência do operador.

A característica principal desta linha de interface entre o dispositivo de automação, ou seja, o CLP, e os dispositivos de campo é permitir a substituição rápida dos componentes. A escolha dos produtos utilizados, também, foi sempre visando facilitar a manutenção, com fixação/extração fácil de qualquer componente.

Como parte principal desta Arquitetura de *Hardware*, pode-se destacar o CLP. A opção para a utilização de um Controlador Lógico Programável, permitiu obter-se um sistema confiável, para o controle do processo. O uso do CLP *SIMATIC- S7*, última versão lançada pela *SIEMENS* (um dos maiores fornecedores de sistemas de automação do mundo)[76], fez com que o desenvolvimento do controle do processo fosse montado com um dispositivo que está entre uns dos

mais modernos da atualidade. Estes controladores *SIMATIC* utilizam um *software* totalmente compartilhado e integrado, permitindo uma programação direta.

4.2.1.3 Montagem do *Hardware* – nível 3 (Gerenciamento do Processo)

A montagem da Arquitetura do *Hardware* – nível 3, pode ser visualizada na Figura 4.10, com uma das telas construídas para o Gerenciamento do Processo de um dos alvos, no caso alvos gasosos.

Figura 4.10: Montagem da Arquitetura do *Hardware* – nível 3, utilizado no Gerenciamento do Processo de um alvo.

4.2.2 Configuração do Software

4.2.2.1 Configuração do *Software* – nível 2 (Controle do Processo)

A Arquitetura do *Software* - nível 2, que abrange o Controle do Processo, utiliza um *software* totalmente compartilhado e integrado. Ela foi usada para configurar e programar os controladores programáveis *SIMATIC S7*.

Um critério foi utilizado para a configuração do *Software* deste CLP no controle do processo dos três porta-alvos, com as seguintes etapas:

- Abertura do Projeto: introdução dos dados, definições de *hardware* e sistema de comunicação
- Definição dos Endereços de Memória: no *software STEP 7*, trabalha-se com endereços de sinais de entrada e saída, bits de memória internos, contadores, temporizadores, blocos de dados e blocos de função. Estes endereços absolutos podem ser acessados, porém o programa será de melhor compreensão se forem usados *tags* associadas a estes. Um endereço pode ser acessado e localizado pelo endereço absoluto (I1.1, M2.0, FB21, etc.) ou por seu *tag* (normalmente representado pela sua função no programa, como por exemplo: "Motor A ligado")
- Criação de Blocos de Função: desenvolvimento do programa propriamente dito, utilizando uma das opções de linguagens apresentadas
- Documentação do *Software*: o programa é melhor compreendido, se for rico em comentários, isto é, muito bem documentado. O *STEP* 7 tem meios de executar estes comentários, com auxílio de recursos, em cada passo da programação.
- Diagnóstico e Teste: o *STEP* 7 permite que seja feito um teste no programa criado, fazendo uma verificação na sintaxe, na lógica e no diagnóstico. A Figura 4.11 mostra as telas das primeiras 4 etapas descritas anteriormente.

As vantagens desta configuração são destacadas a seguir:

- Configuração e programação integrada nos mais diversos sistemas. Uma vez adquirido o *know-how*, este pode ser utilizado, para os vários modelos de controladores *SIMATIC*, em todos os níveis de desempenho;
- Investimento seguro em *software*, mesmo no caso de inovações no *hardware*, já que atualizações e melhorias são continuamente incorporadas, ou seja, é uma valiosa contribuição para proteger investimentos futuros;

Figura 4.11: Tela da Abertura do Projeto, Configuração do *Hardware* e Lista com Definições de Endereços.

- Além disso, a integração do *Software* Industrial *SIMATIC* não se aplica somente aos controladores *SIMATIC*, mas para todas as linhas de interface homem-máquina e a todos os tipos de rede de comunicação, desde o nível Corporativo até o nível de Chão de Fábrica. Tudo isso, com o uso de um único banco de dados, que faz parte do conceito Automação Totalmente Integrada;
- Facilidade de alteração da lógica de controle, sem a necessidade de: implementação de novos componentes internos ao painel e de alterar a sua fiação (o que ocorreria num painel convencional a relés);
- A redução dos espaços, já que comandos convencionais a relés necessitam de metros de painéis, enquanto que a lógica com CLP não necessita de relés, relés com memória, temporizadores, contadores, etc, reduzindo o tamanho físico dos painéis.

A Figura 4.12 dá uma idéia de como a programação estruturada *Ladder* foi elaborada, para o desenvolvimento deste trabalho.

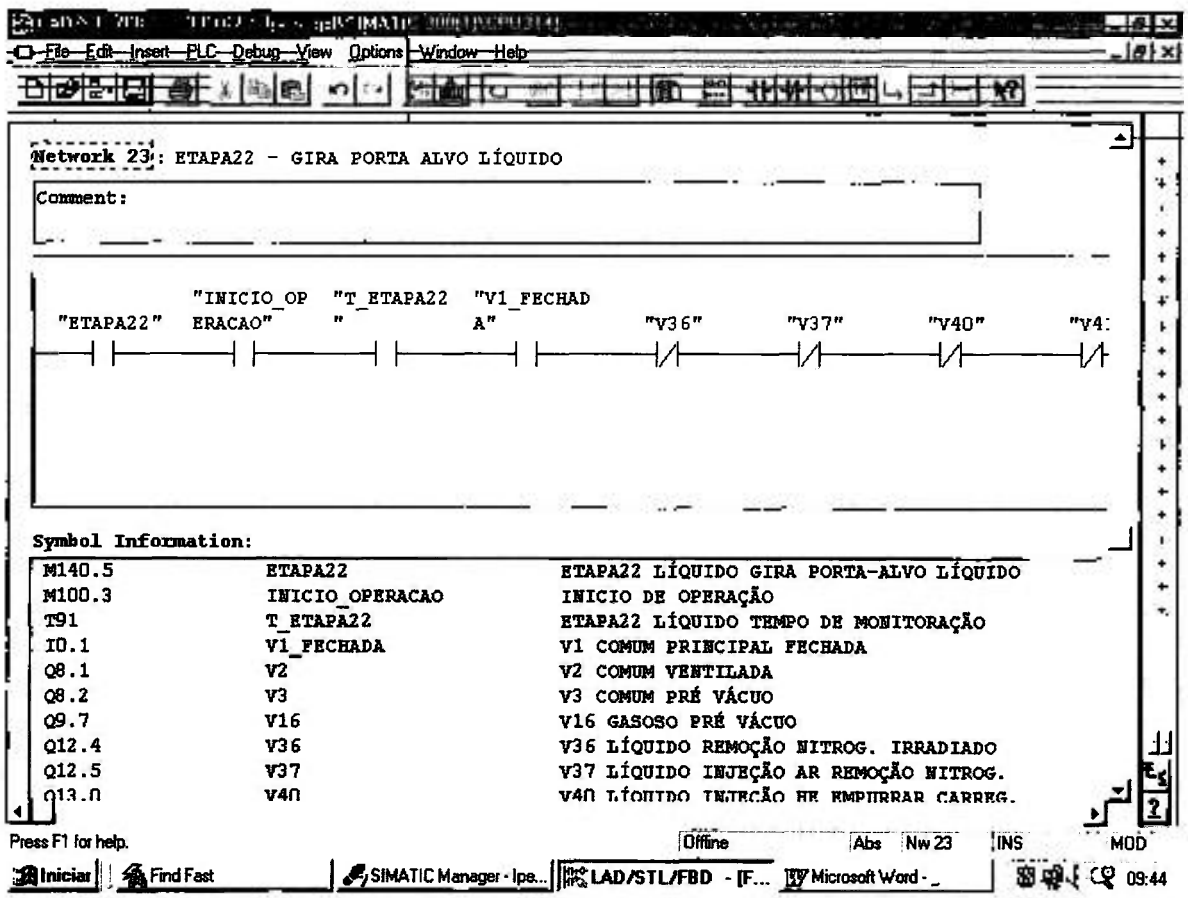


Figura 4.12: Descrição dos elementos de comando e a função de cada linha de programa, utilizando o *Software* SIMATIC *S7*, da SIEMENS.

4.2.2.2 Configuração do *Software* – nível 3 (Gerenciamento do Processo)

Na configuração do *Software* - nível 3, correspondente ao Gerenciamento do Processo, foi desenvolvido um *software* de supervisão, com operação totalmente integrada para os três porta-alvos. Este software gerencia toda a produção, em tempo real, permitindo a emissão de relatórios e monitorando graficamente todos os valores controlados durante o processo, desde a carga do material até sua coleta e transporte. Qualquer falha de operação é monitorada e percebida instantaneamente, permitindo uma rápida tomada de decisão e assegurando um índice de perdas próximo de zero.

A utilização do *Software* da *Unisoft* foi a solução encontrada para a criação de aplicativos para esta supervisão, por ser mais acessível, amigável e flexível. Com ferramentas específicas para a automação, substitui, com vantagens, soluções demoradas e caras, sendo aplicável em processos de qualquer natureza. Recursos como animações, gráficos, e históricos e muitos outros, além de uma extensa biblioteca, tornam o *Unisoft* extremamente versátil. Podem-se destacar alguns itens, que foram realizados com ajuda do *Software* da *Unisoft* para este sistema supervisório:

- Anúncios de situações de alarmes em cores diferenciadas das de operação normal;
- Tela com lista de alarme *online* e histórico;
- Registro da data e hora do início da irradiação
- Dispositivo de reconhecimento de alarmes;
- Gráficos, em tempo real, registrados como históricos, permitindo a visualização de até seis variáveis, simultaneamente (correntes de feixe no alvo, no colimador e nos quatro-setores);
- Relatórios com todas as informações da irradiação.

Para interface com o CLP, ou seja, para a aquisição de dados do controle, o sistema de Supervisão *Unisoft* utiliza uma interface específica de *software*, chamada de *Driver* de Comunicação.

Para os respectivos processos dos alvos sólido, líquido e gasoso, foram desenvolvidos os seguintes itens:

- Confecção das telas, seqüência de encadeamento e seleção, independente para cada tipo de alvo;
- Desenvolvimento de disparo de mensagens e eventos de alarmes;
- Definição dos procedimentos de navegação nas telas.

Esta aplicação utiliza todos os recursos disponíveis desta ferramenta, bem como as do ambiente *Windows*, por causa de sua compatibilidade.

O sistema é dirigido por um menu auto-explicativo, com telas gráficas coloridas, representando aspectos essenciais do processo de controle e etapas de seqüência dos diversos tipos de procedimentos utilizados neste sistema de irradiação.

O operador responsável pela irradiação pode iniciá-la por intermédio da introdução de algumas informações, como: tipo de alvo e dose integrada solicitada pelo usuário, definindo automaticamente todo o *setup* necessário para a produção do radioisótopo. Todo o controle físico do processo será realizado pelo *software* do CLP, sem a necessidade de intervenção do operador.

Todos os eventos são indicados nas telas do supervisório, sendo a comunicação de falhas de visualização rápida, mediante a mudança de cor no local do evento (verde para vermelho), informação detalhada, por meio de mensagens de erro, combinações pré-selecionadas de feixe, *status online* do processo e operação dos alvos e, por fim, a visualização das etapas do processo.

Todos estes itens apresentados definem que este sistema é definitivamente uma interface homem/máquina (IHM) integrada ao controle de processo desenvolvido.

No início do processo, o operador informa o tipo de alvo e coloca todo o sistema na posição "0" (condições prévias, que satisfazem o início do processo). Estas informações são conferidas e se estiverem corretas, o processo se inicia. Caso contrário, o supervisório informa qual a anomalia e o operador toma as devidas providências para começar o processo.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP IPEN

Desta forma, o operador, definitivamente, não precisa ser um profissional altamente especializado, deixando o especialista livre para realizar atividades mais nobres, ligadas à pesquisa e desenvolvimento.

A Figura 4.13 mostra a tela utilizada para a construção do sistema supervisório do alvo líquido, com as janelas de ferramentas para confecção. Observa-se que, todos os parâmetros e dispositivos envolvidos neste processo devem ser desenhados em todas as situações a que estarão sujeitas, com suas respectivas animações: por exemplo, o injetor e o alvo em posições 0^0 e a 90^0. Neste trabalho, foram estabelecidas as seguintes cores: verde – ligado; vermelho – alarme e cinza – desligado.

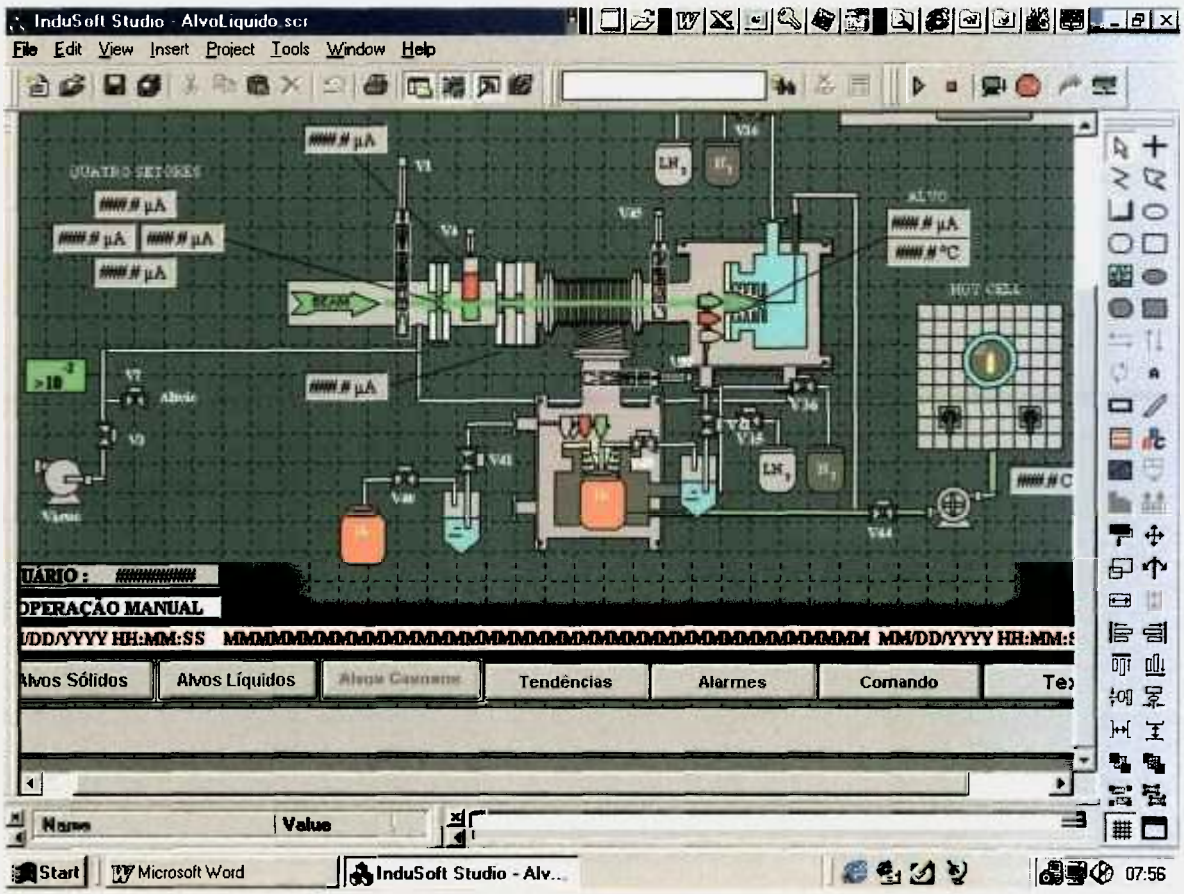


Figura 4.13: Tela de construção do sistema supervisório para o alvo líquido, com as janelas de ferramentas para confecção.

Por meio de uma relação de variáveis e estados a serem visualizados e controlados, as telas foram configuradas com *Software* da *Unisoft*, associando-se a elas uma descrição e o endereço no CLP. Este procedimento permitiu que as

mensagens e dados fossem mostrados nas diversas telas, conforme as necessidades do processo. A Figura 4.14 mostra esta relação e como estão dispostos os dados no supervisório.

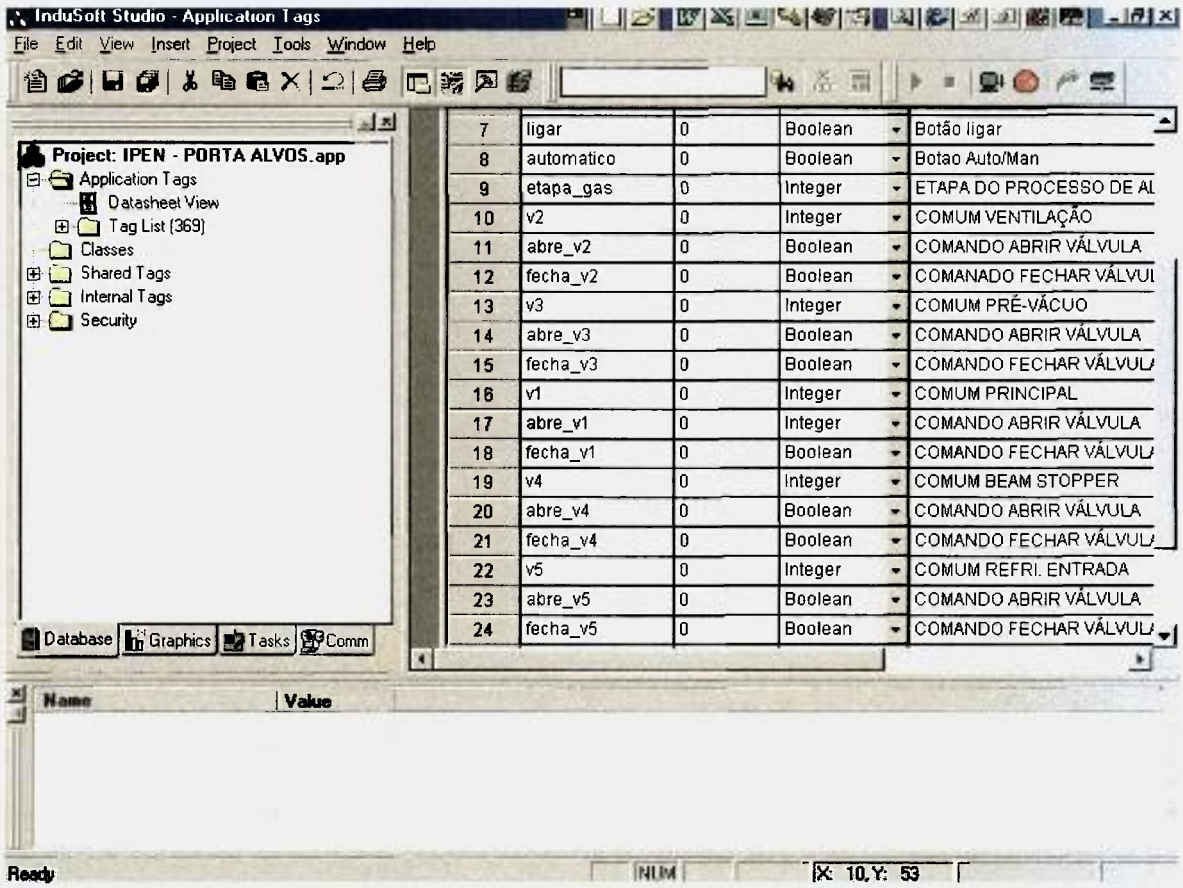


Figura 4.14: Relação de variáveis e estados e disposição dos dados no supervisório.

Após o desenvolvimento destas seqüências de procedimento, o *Software* do sistema supervisório estava em condições para ser colocado em operação.

A Figura 4.15 mostra a tela já construída para o gerenciamento do processo do porta-alvo líquido. Nela, pode-se observar em qual etapa está o processo que, no caso, está na etapa de "Rotação". Pode-se visualizar, na parte inferior à direita, a tecla "Comando", que quando acionada, possibilita a atuação do operador para: Seleção do Alvo, Comando de *Reset*, Comando Manual/Automático e Comando liga/desliga. No lado esquerdo, observa-se uma janela de válvula (no caso, válvula V2), que aparece somente no comando manual, uma janela semelhante aparece sempre quando qualquer componente

for acionado, ficando a janela localizada sobre o componente solicitado. O alvo que estiver acionado ficará apagado na tela (parte inferior). Isto não impede que a tela dos dois outros alvos (sólido e gasoso) possam ser selecionadas pelo operador, apenas para visualização.

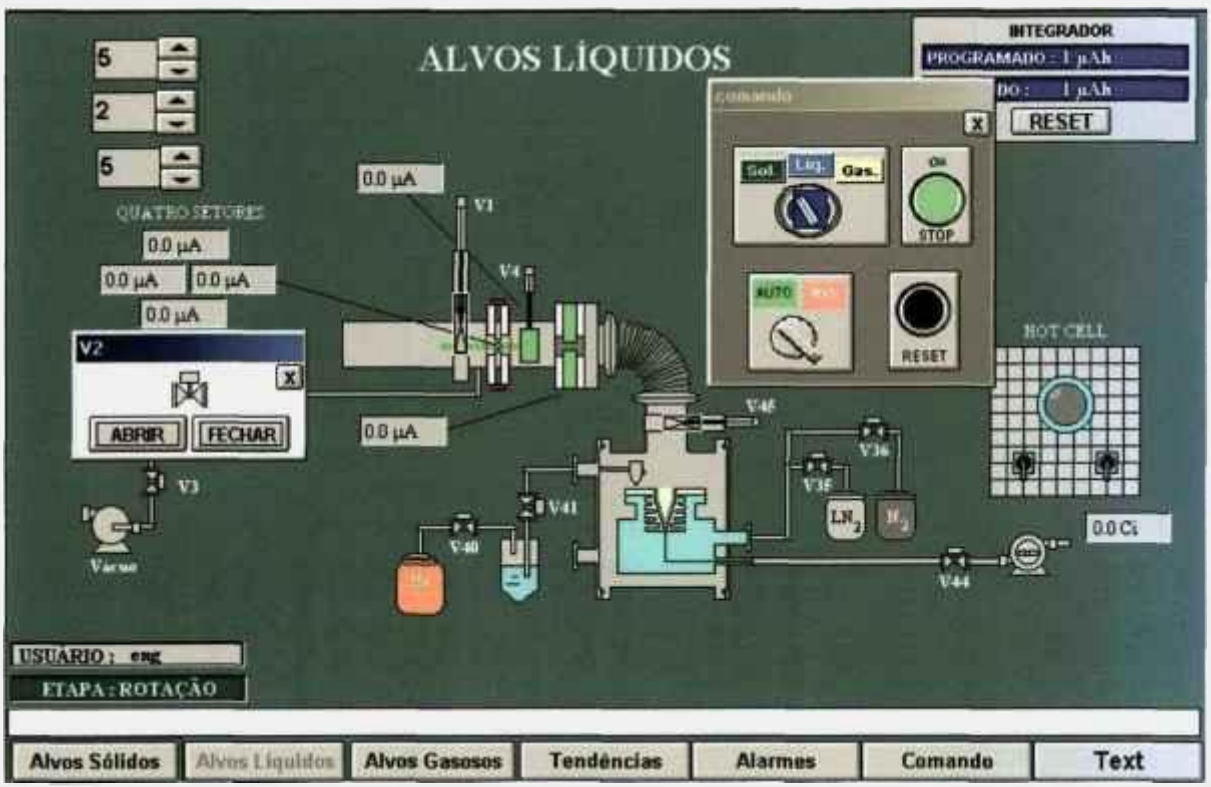


Figura 4.15: Tela construída para o gerenciamento do processo de irradiação de alvos líquidos (etapa de "Rotação").

Nas Figuras 4.16 e 4.17, podem ser visualizadas as telas construídas para o gerenciamento dos processos dos porta-alvos gasoso e sólido, respectivamente. Pode-se notar que, na Figura 4.16, como é o processo do alvo gasoso que está operante, a sinalização relativa a este processo, na parte inferior da tela, está apagada. Ele pode ser verificado para o processo do alvo sólido na Figura 4.17.

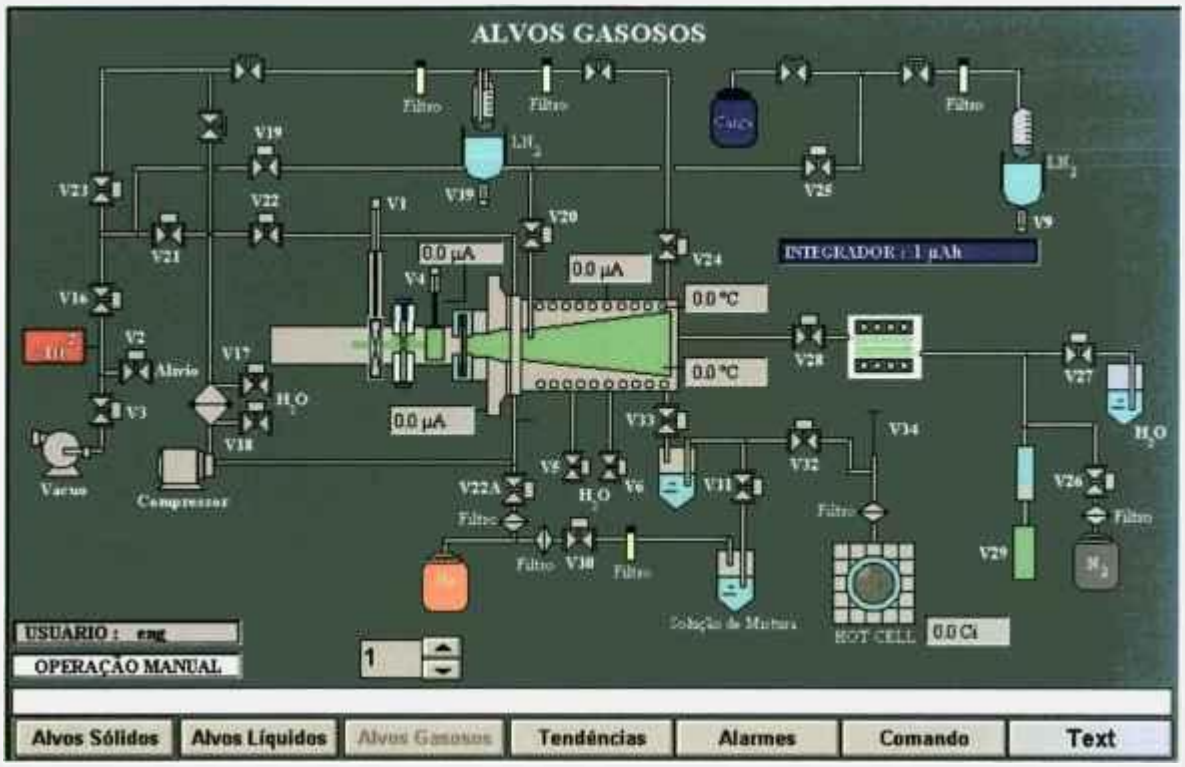


Figura 4.16: Tela construída para o gerenciamento do processo de irradiação de alvos gasosos.

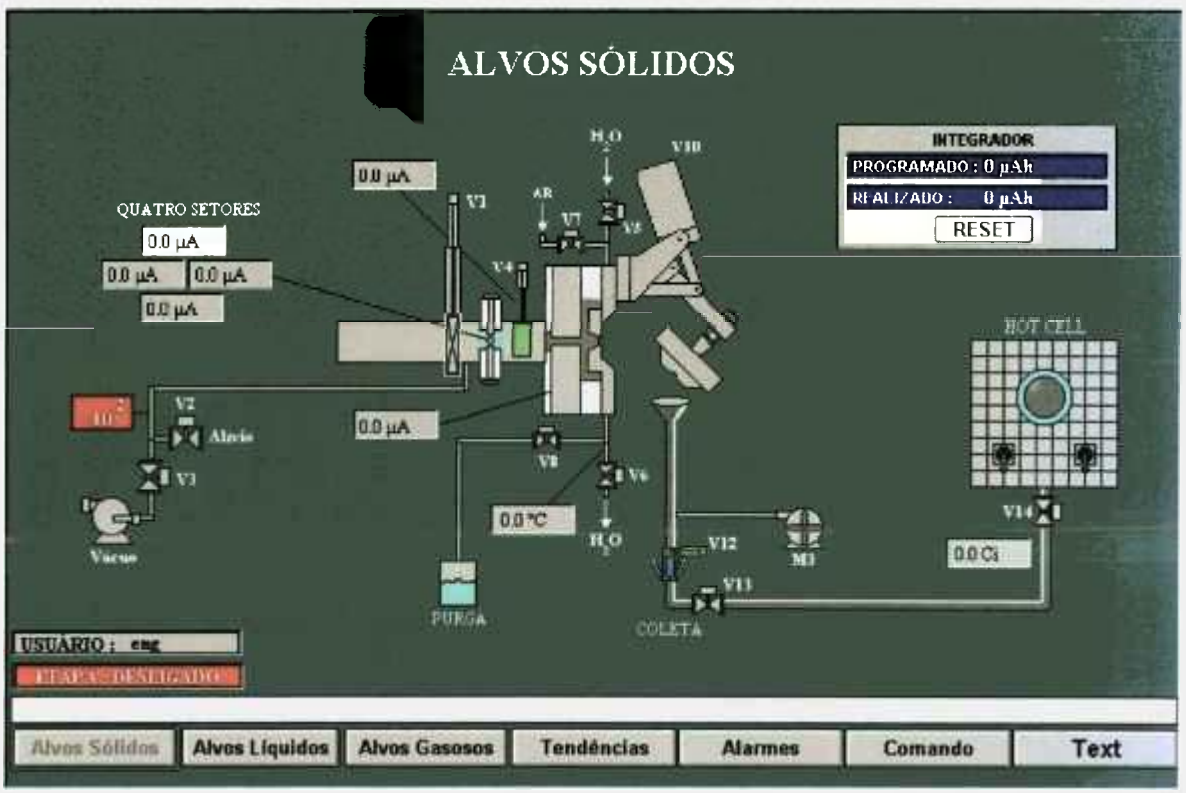


Figura 4.17: Tela construída para o gerenciamento do processo de irradiação de alvos sólidos.

Na Figura 4.18, é apresentado o sistema já desenvolvido, implementado e em funcionamento. Nela pode-se observar o supervisório operando, com a janela do porta-alvo gasoso. As outras duas telas também podem ser solicitadas, estando disponíveis para sua operação.

Figura 4.18: Apresentação do sistema já desenvolvido e implementado com o microcomputador instalado no Painel de Controle, especialmente projetado para esta aplicação.

O sistema conta com uma tela de ocorrência de alarmes para registrar qualquer falha que aconteça durante o processo. Aparecem na tela alarmes escritos e/ou sonoros, orientando o operador para atitudes a serem tomadas. O alarme pode ser reconhecido, por meio de seu respectivo campo, na parte inferior da tela, mesmo que este já tenha saído desta condição. Um exemplo de tela desenvolvida pode ser visto na Figura 4.19, que mostra os tipos de falhas, em

cores distintas, auxiliando o operador, por intermédio de um histórico, em uma eventual manutenção ou mesmo na estatística de tempo de vida média de determinados componentes.

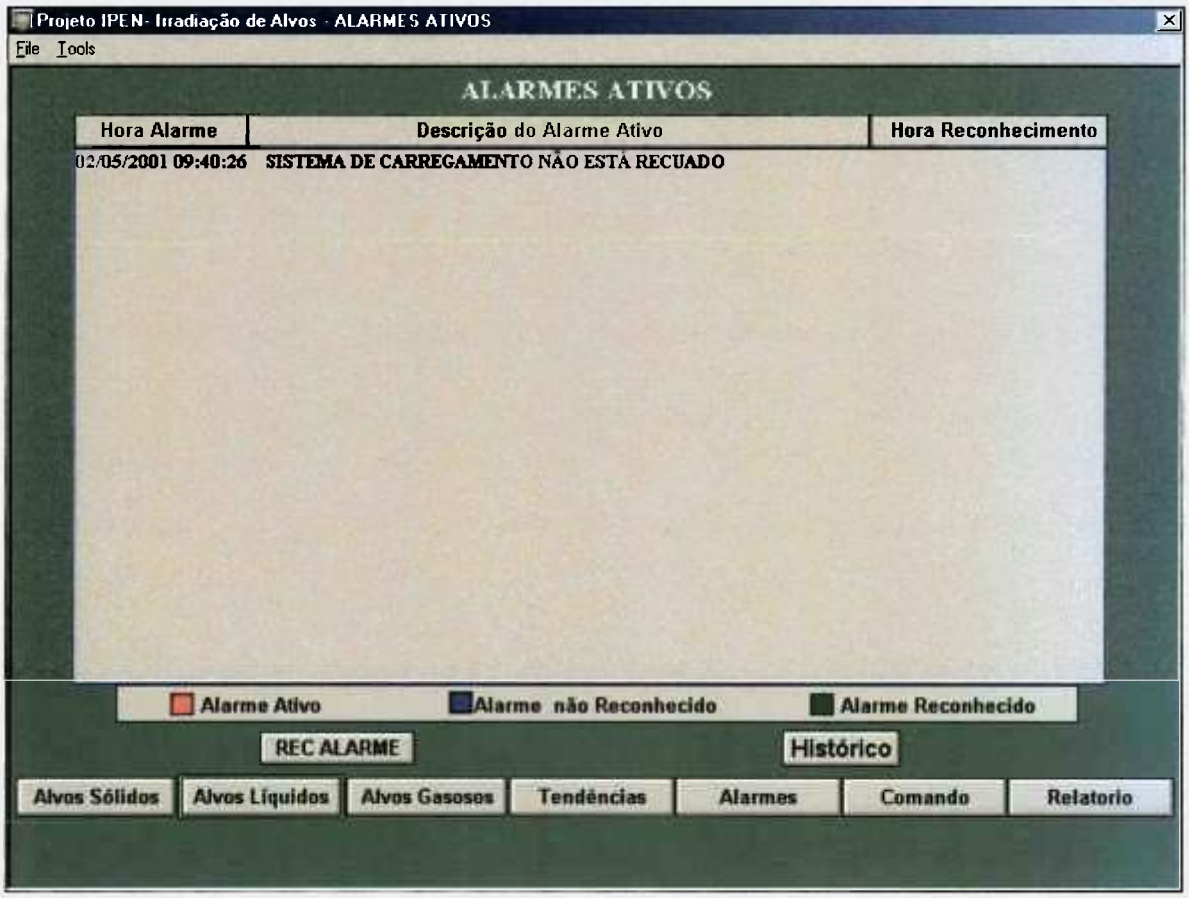


Figura 4.19: Tela de alarmes desenvolvida, para visualização das falhas que eventualmente podem ocorrer durante o processo, e a forma pela qual são comunicadas ao operador.

A qualquer tempo, estes dados podem ser recuperados dos arquivos e mostrados em gráficos de tendências de histórico. O operador pode usar esses dados armazenados para examinar os eventos acontecidos, auxiliando assim, na identificação mais rápida de eventuais problemas. Os dados armazenados representam uma poderosa ferramenta para correção e otimização de processos.

A Figura 4.20 apresenta os gráficos de tendências, monitorando as correntes de feixe, com seus respectivos códigos de cores, que são diferenciadas para permitir uma melhor visualização do estado da variável. Na tela mostrada na Figura 4.20, pode-se verificar que o acompanhamento dos parâmetros está

sendo feito *online*, não sendo descartada, caso necessário, a possibilidade de se fazer um levantamento do histórico, pois estes valores ficam registrados em memória. Estes gráficos também estão disponíveis para impressão.

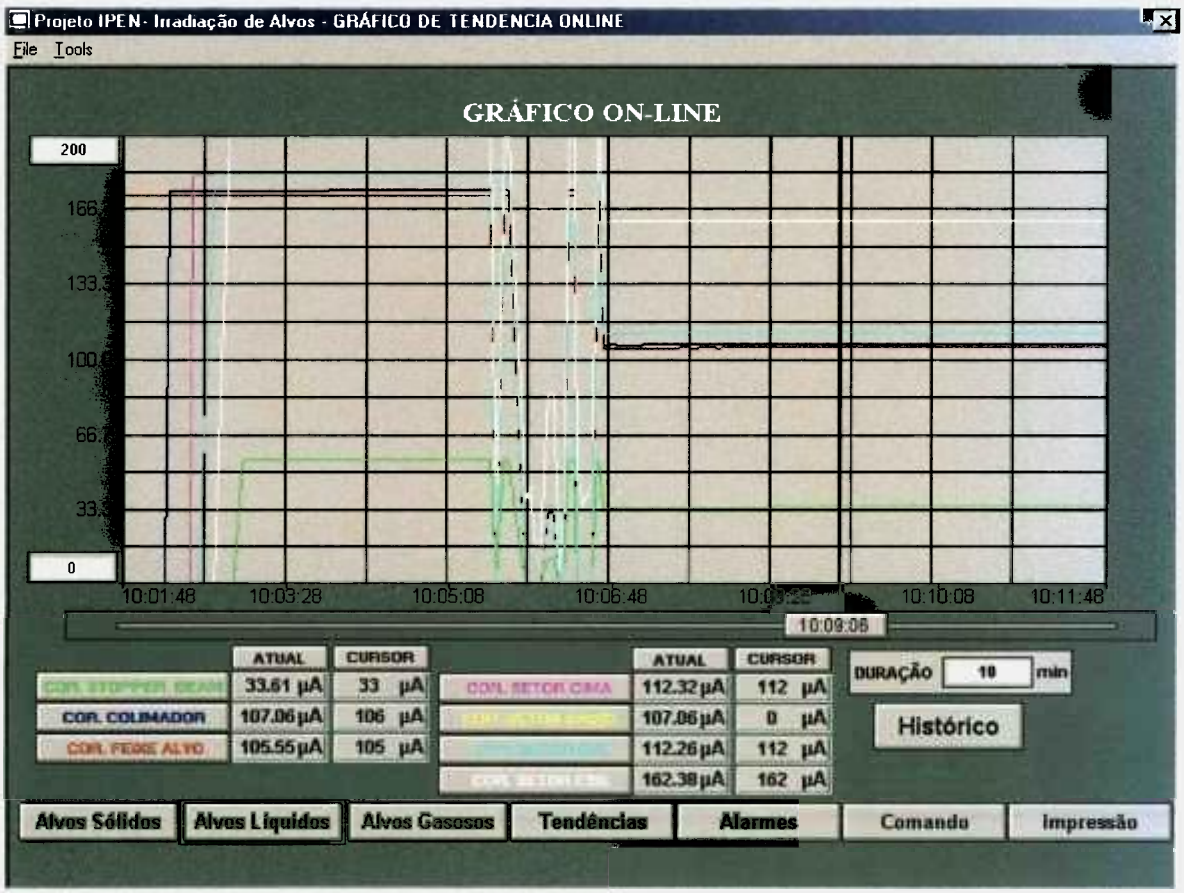


Figura 4.20: Tela desenvolvida para a obtenção das tendências com as principais variáveis dos parâmetros do feixe.

Pode-se observar na Figura 4.21, o modelo de relatório confeccionado para este trabalho, utilizando-se a ferramenta do *Unisoft*. Um relatório detalhado pode ser obtido e impresso, sempre que for solicitado, sendo muito conveniente, principalmente, para o usuário que precisa ter informações dos parâmetros da irradiação. Este levantamento completo facilita a visualização geral das condições de irradiação, representando um auxílio bastante valioso para suas análises e interpretações, tanto para uma ação corretiva, como para realizar um controle de qualidade.

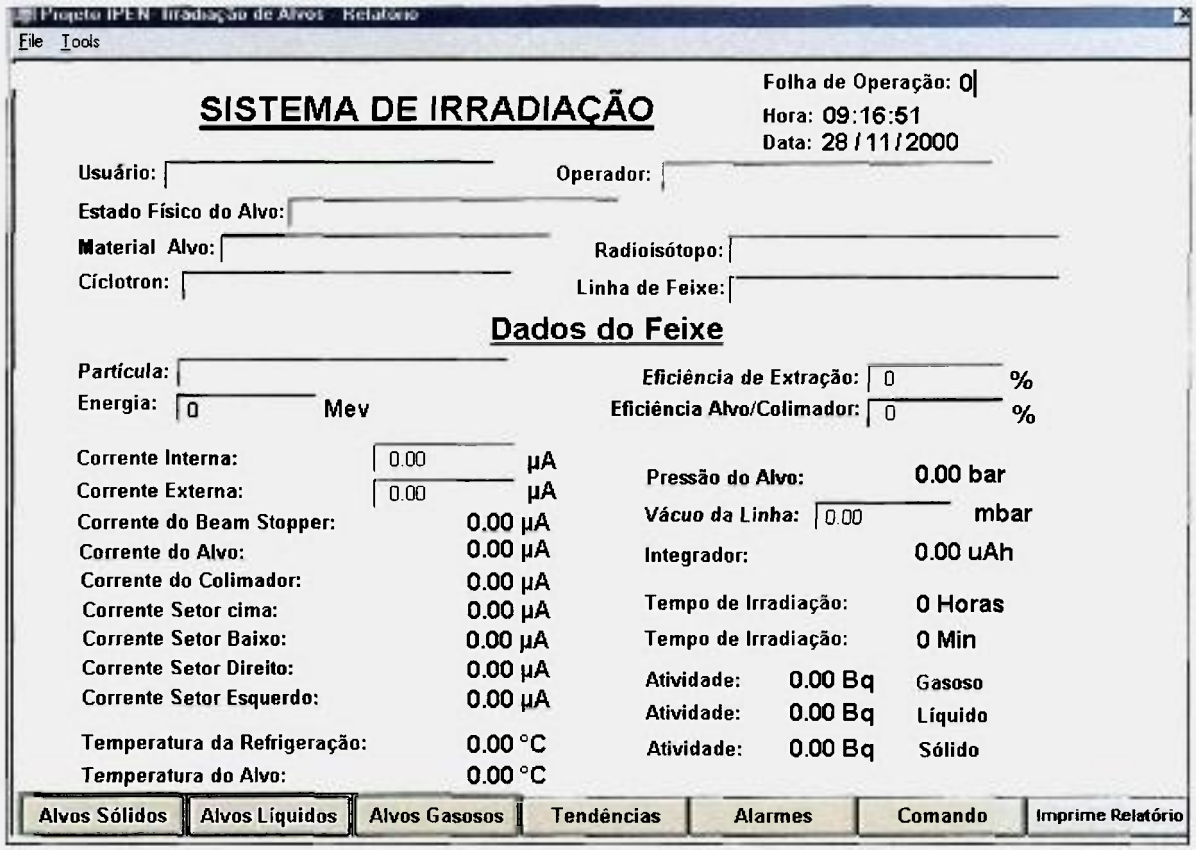


Figura 4.21: Modelo do relatório desenvolvido para acompanhamento dos parâmetros envolvidos no processo de irradiação.

4.3 OPERACIONALIDADE

4.3.1 Operacionalidade do Sistema de Automação

Os testes citados no item 3.6 do capítulo anterior foram realizados para verificar o funcionamento da automação. Nesta fase são realizados os últimos ajustes do sistema, adequando-o às condições de operação, desde as tolerâncias de fabricação, seqüência lógica, até os parâmetros de desempenho, de tal forma a serem cumpridas todas as etapas necessárias para a aceitação do sistema de automação. Durante a execução de cada teste, era verificado se o equipamento estava trabalhando satisfatoriamente e se preenchia os requisitos descritos. Qualquer falha apresentada, o problema era anotado e solucionado. Com a falha registrada e os ajustes efetuados, o equipamento era colocado em operação novamente, para assegurar que todos os parâmetros estavam dentro das especificações.

4.3.1.1 Operações em Vazio

As operações em vazio, feitas em laboratório, permitiram uma análise preliminar do painel de campo e do painel de controle, onde puderam ser corrigidas algumas situações e serviram como ponto de partida para as operações com carga. A verificação visual na instalação geral permitiu que fossem verificadas e corrigidas as ligações das fiações nos respectivos conectores. Durante a medida da tensão de linha na entrada do sistema não foi verificada nenhuma queda. Os fusíveis foram ajustados com diversos valores, de acordo com a carga de cada parte do circuito.

Pela verificação da seqüência de fase pôde ser corrigido o sentido de movimento dos motores, com suas respectivas rotações. Os sensores térmicos dos motores foram ajustados, conforme seus limites de correntes suportadas.

Os conversores de sinais foram calibrados, por meio de ajustes dos potenciômetros adequados (externos e internos), nos pontos zero e máximo. A polaridade também foi ajustada e invertida, quando necessário.

Foi verificado o funcionamento das botoeiras de emergência, que quando acionadas, desligam toda a linha de potência.

Foram feitos ajustes e regulagens dos limites de alarmes, para que eles atuassem dentro do intervalo preestabelecido.

Na energização do sistema foram verificados todos os posicionamentos mecânicos e observados os limites de segurança de cada fim de curso, fazendo-se os ajustes finais para liberação do acesso ao modo automático de operação.

Com o recurso de monitoração e de modificação de variáveis do *Software SIMATIC,* pôde-se exibir estados atuais de operação do programa. Esta ferramenta ajudou muito na simulação do processo. Assim, a depuração do programa ou *Hardware* do CLP foi facilitada e, com isto, foram selecionados vários pontos do ciclo do processo e executada a monitoração, com as modificações desejadas.

Durante a operação em vazio, o sistema foi submetido a limites de segurança e proteção ou em condições críticas, para verificação de instabilidade e possíveis falhas.

O sistema de diagnóstico, com suas funções integradas, para a identificação e registro de defeitos e as ferramentas associadas ao *STEP 7* auxiliaram na localização de erros e na solução de problemas associados ao sistema, como falhas na CPU, nos módulos de entradas e saídas e nos programas.

4.3.1.2 Operações com Carga

Durante a operação com a carga máxima exigida, feita em laboratório, foram ajustados os limites preestabelecidos, quando necessário, a saber: temporizadores, contadores, temperaturas e pressões. Os motores e os dispositivos de irradiação funcionaram de acordo com o esperado.

Todos os erros ocorridos durante a operação do sistema de automação foram anotados, com respectivos métodos de correção.

Nas operações com carga, o sistema de automação permitiu uma avaliação do comportamento dinâmico do processo, que teve sua validação previamente confirmada pelas operações em vazio.

Primeiramente, foi instalada a alimentação geral trifásica, com tensão de 220VAC, permitindo assim que fosse feita a operação do sistema por partes, energizando a fiação equivalente de cada circuito e possibilitando, desta maneira, a correção de qualquer inversão que possa ter ocorrido durante a montagem. Estas operações foram feitas em vazio, para evitar qualquer dano na carga. Foram aferidos todos os instrumentos de medição com valores padrões. Todas as proteções foram simuladas em condições críticas, verificando-se, assim, a sua atuação em caso de emergência ou falha. Foram ajustados as chaves fins de curso, os cilindros pneumáticos, com os seus respectivos dispositivos mecânicos e, também, os sensores, para as faixas de valores preestabelecidos. Após estes ajustes e acertos das ligações, foi feita a simulação do funcionamento do

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP IPEN

controle, elementos de campo e porta-alvos. Nestas simulações, foram ajustados os tempos de acionamento, as etapas lógicas e respectivas seqüências de operação, forçando algumas variáveis, para conferir a resposta. Portanto, foram verificadas toda a parte funcional, lógica e sequencial do processo, corrigindo-se as falhas e ajustando-se os valores preestabelecidos, de acordo com a necessidade de cada porta-alvo. Todas as variáveis, como por exemplo, tempo, contagem, temperatura e corrente foram ajustadas. A verificação da estanqueidade, tanto dos porta-alvos, como das tubulações, conexões e válvulas do Painel de Campo foi realizada, utilizando-se um *Leak Detector da Edwards*. Isto permitiu que fossem feitos os ajustes para sua correção. Após estes ajustes e verificação de estanqueidade, foi ligada a parte de automação em vazio, apenas para corrigir qualquer anomalia na parte elétrica, principalmente para acertar a continuidade. Após estas correções, o sistema foi ligado em plena carga e verificado e ajustado o seu desempenho. Foram verificados todos os motores e ajustados seus respectivos sentidos de rotação e verificada suas correntes. Convém destacar que, neste trabalho, foram instalados quatro motores (vácuo, compressor de hélio, injetor e bomba peristáltica). Também foi ajustada a temperatura dos quatro aquecedores utilizados no sistema de carregamento, recuperação, vaporização e secagem. Nestes testes, também foram calibradas as leituras do Controle, para as medidas de temperatura, pressão e corrente, com valores padrões conhecidos. As seringas foram ajustadas com os seus respectivos cursos de atuação. Foi verificado o sistema de transferência do gás, com o bombeamento via método criogênico.

Após o término da instalação e montagem do *hardware* e a finalização da configuração do *Software* do sistema de irradiação automatizado, partiu-se para a operação do sistema de forma geral. A simulação foi feita integralmente em condições de utilização real de um regime de produção.

4.3.2. Operacionalidade dos Porta-alvos

Conforme citado anteriormente, os porta-alvos foram, preferencialmente, confeccionados de forma a possuírem dois requisitos principais:

- primeiro, ligado diretamente à automação, é que eles possam representar a irradiação de alvos nos três estados físicos (sólidos, líquidos e gasosos), dando

uma abrangência, a mais completa possível, de toda a seqüência necessária para irradiações. Este fato tem uma implicação direta no desenvolvimento de uma automação realmente significativa e de aplicação direta seja nas produções rotineiras seja nas pesquisas em geral, que utilizam o cíclotron como fonte de irradiação;

- segundo, diretamente direcionado ao uso em produções de radioisótopos, é que eles possam ser utilizados com materiais enriquecidos (de custo elevado), portanto, direcionados ao uso de quantidades pequenas de material alvo.

Estes dois fatos são de fundamental importância para compreender o direcionamento dado ao presente trabalho.

O principal objetivo, foi o desenvolvimento da automação, considerado completado com os testes e simulações dos três porta-alvos instalados nas linhas de feixe. Outro fator, é o desempenho dos três porta-alvos no que diz respeito ao rendimento do radioisótopo obtido, que é uma função direta da intensidade de corrente que pode ser colocada no alvo. No caso do presente trabalho, a intenção foi usar três sistemas completos, que podem ser considerados como pontos de partida bastante realistas para serem utilizados e/ou adaptados para possível uso em produções. O fundamental é que a seqüência lógica de operação está automatizada, com inúmeros pontos de retorno de informações e condições de segurança. Isto é importante de ser citado pois, para os testes estava disponível o cíclotron CV-28, portanto com corrente externa disponível muito aquém da disponível no Cyclone 30 para produções comerciais (300μA). Assim, irradiações com baixas correntes , com certeza, não trariam situações reais de anomalia. Em termos de automação, isto seria equivalente a induzir situações de emergência para verificar a resposta do controle. Deve ser enfatizado que, uma vez solicitada pelo controle uma determinada etapa (por exemplo, tombamento do alvo criogênico), esta tarefa era realmente executada no sistema de irradiação, e, uma determinada anomalia era induzida no porta-alvo sendo esta ocorrência era detectada pelo controle.

Assim , todas as simulações feitas em laboratórios foram refeitas com os porta-alvos instalados nas linhas de feixe. Em todos os casos a irradiação foi simulada injetando-se sinais de corrente no alvo, nos quatro setores e no *beam-stopper*. Uma vez que a dose integrada atingia um valor pré-fixado, o *beam-*

stopper e a válvula gaveta eram fechados automaticamente.

Em relação as outras etapas do controle, cada uma possuía características particulares, conforme citado a seguir, nos itens 4.3.2.1, 4.3.2.2, 4.3.2.3.

4.3.2.1 Porta-alvo Sólido

A simulação da operacão do porta-alvo sólido mostrou que todas as etapas do fluxograma da Figura 3.28 apresentaram funcionamento de acordo com a lógica configurada tanto no modo automático como no manual. Isto incluiu a fixação do alvo no compartimento acionado pneumaticamente. Uma vez que o pré-vácuo atingisse um determinado valor pré-fixado, a refrigeração com água era automaticamente ligada e verificada a pressão, o fluxo e a temperatura. Os comandos referentes a estes sinais, enviados ao CLP, foram seguidos no monitor. Nesta fase, induções de situações de emergência, como por exemplo, interrupção no fluxo de água, variações anormais de corrente de feixe e temperatura do alvo foram provocadas, com imediato reconhecimento pelo controle, mostrando ao operador algumas situações de emergência e facilitando, desta maneira, a identificação de erros. Terminadas estas simulações de irradiação, a refrigeração foi desligada e a água residual foi purgada e o alvo retirado automaticamente, caindo em uma blindagem.

No caso do alvo sólido, o sistema foi ensaiado durante a irradiação. Um alvo com zinco natural, eletrodepositado em placa de cobre niquelada, foi submetido a irradiação, por uma hora, com prótons de 24 MeV e corrente de 10μA, apresentando rendimento de produção do ^{67}Ga de 0,6mCi/μAh, no *EOB*.

4.3.2.2 Porta-alvo Gasoso

Os ensaios do porta-alvo gasoso, nos modos manual e automático, também demonstraram que a lógica estabelecida no fluxograma da Figura 3.29 obedeceu à programada. Foi dada atenção nas seguintes etapas, consideradas as mais críticas:

- Verificação do fluxo e pressão da água de refrigeração do corpo do porta-alvo

e do hélio de refrigeração das janelas;
- Estanqueidade e teste de pressão do porta-alvo;
- Transferência e recuperação do gás, utilizando-se gás criptônio para preenchimento da câmara com pressão em torno de 4 bar;
- Aquecimento e lavagem do porta-alvo;
- Retirada do material alvo do porta-alvo;
- Comportamento das seringas, acionadas pelos pistões pneumáticos, com seus respectivos fins de curso;
- Coleta no frasco final.

Todos os sensores, tais como, termopares do porta-alvo, dos aquecedores, fins de curso dos pistões, sensores de pressão do gás e do hélio, tiveram valores simulados e puderam ser acompanhados na tela do monitor.

4.3.2.3 Porta-alvo Líquido

Também para o porta-alvo líquido, os ensaios foram feitos nos modos manual e automático e confirmaram que o desenvolvimento da lógica de controle segue na prática, ao fluxograma mostrado na Figura 3.30. Neste caso, quatro pontos principais foram verificados, os quais são considerados fundamentais para este tipo de porta-alvo:
- Preenchimento da câmara criogênica com nitrogênio líquido: o sensor, acoplado ao controlador de nível, enviava sinal ao CLP sendo acionadas as válvulas de carga de nitrogênio. O termopar, colocado diretamente no cone, indicava a temperatura do cone. Simulações de perda de nitrogênio foram feitas, com resposta positiva do controlador;
- Rotação de 90º do conjunto inteiro do porta-alvo sem movimentos laterais e sem problemas de estanqueidade em função da dobra do fole de acoplamento. Fins de curso indicavam o posicionamento do conjunto;
- Injeção de 1 ml de água e fixação no cone refrigerado com nitrogênio líquido;
- Coleta da água que foi congelada no cone: após rotação de 90º e purga do nitrogênio líquido, a água foi transportada com uma bomba peristáltica a um recipiente e medido o volume coletado. Volumes injetados de 1ml não resultaram em perdas mensuráveis no volume coletado.

Aqui também, todas as ações solicitadas pelo controle realmente eram executadas no sistema de irradiação e todos os retornos de sensores eram devidamente acompanhados no monitor.

4.3.3 Considerações Gerais

Esta pesquisa proporcionou utilizar uma tecnologia atual, pela necessidade de se estudar detalhes alternativos e soluções de última geração na área de automação industrial.

Este processo de automação abrangeu uma variedade de parâmetros de interface homem-máquina, desde Painéis de Controle e Campo até a Arquitetura dos *Softwares*, englobando sua programação e permitindo atender às necessidades específicas.

Para o desenvolvimento da automação do sistema de irradiação de alvos sólidos, líquidos e gasosos foram pesquisados dispositivos que combinassem tanto a tecnologia de ponta do mercado internacional como a realidade da indústria brasileira, buscando sempre proporcionar a melhor relação custo/benefício e procurando soluções especiais, de acordo com as necessidades de cada aplicação.

Os três porta-alvos foram montados na parte superior do Painel de Campo e acoplados diretamente na linha de feixe. Esta proximidade do Painel, uma tendência que vem sendo adotada nos sistemas de produção de radioisótopos, que contém todos os componentes envolvidos no processo, permitiu que a interligação fosse feita com o menor comprimento de tubos e/ou mangueiras. Isto é importante, tanto no transporte do material alvo como na eficiência de vácuo. Também pode-se destacar a melhoria da refrigeração (tubulação curta) e segurança operacional (retorno de informações por intermédio de sensores).

Como descrito no Capítulo 3, para a implementação deste projeto de automação, houve a integração do Sistema de Irradiação de Alvos com os Painéis de Campo e de Controle. O sistema desenvolvido conta com alta tecnologia em CLP, que alia conforto e praticidade para os operadores, os quais podem

administrar o processo por intermédio de um computador, com a ajuda de um Sistema Supervisório. Assim, mediante uma interface gráfica animada e de alta definição, o sistema fornece informações claras e objetivas de toda a operação, permitindo identificar e corrigir qualquer anormalidade instantaneamente.

O comando antigo do Sistema de Irradiação de Alvos, utilizado por muitos anos no cíclotron *CV-28* do IPEN, era um tipo convencional a relé, com sistema de monitoração estático, sendo muitas etapas executadas manualmente, para se conseguir uma seqüência de operação lógica durante a produção de radioisótopos. Todas as etapas de controle dependiam diretamente do operador, portanto, sujeitas a erros. Atualmente, com o objetivo de aumentar a produtividade e dar maior flexibilidade e facilidade de operação, novas tecnologias são aplicadas, como a de Estado da Arte, que é empregada internacionalmente em sistemas de controle complexos e críticos, tornando-os fáceis de serem operados, mais seguros, com alta confiabilidade operacional e produtiva. No Comando atual, no qual se aplica a lógica por meio de CLP, o sistema de monitoração é *online* e pode ser desenvolvido com um alto grau de automação.

Uma comparação pode ser feita entre o Comando Convencional com Relé e o Comando com Lógica de CLP, e é mostrada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Comparação entre o Comando Convencional com Relé e o Comando com Lógica de CLP

Comando Convencional com relé	Comando com Lógica de CLP
Sistema de monitoração estática	Sistema de monitoração *online*
Dificuldade operacional/manutenção	Simplicidade operacional/manutenção
Seqüências manuais de Etapas	Seqüências automáticas de Etapas
Estrutura complexa	Estrutura compactada
Maior propensão a erros	Maior segurança
Menor produtividade	Maior produtividade

Pode se dizer que, a substituição de controles baseados em relés por CLPs proporcionou um grande avanço no controle de processos, pois quando se trata

de operar manualmente, o homem é o elo mais frágil, suscetível a erros de julgamento, que pode ter conseqüências bastante sérias. Em geral, equipamentos antigos não conseguiam operar regularmente em situações de alta produção, que eram interrompidas com freqüência para serviços de manutenção, não havendo condições de realizar análises rápidas dos problemas, gastando-se muito tempo em investigações, para se chegar em conclusões concretas.

No sistema desenvolvido, todas as funções necessárias para a utilização dos respectivos dispositivos de irradiação, solicitadas pela interface Operador-PC, são realmente executadas pelo sistema via CLP, seguindo a lógica de controle determinada e, em qualquer anomalia durante o processo, uma realimentação tenta corrigir o defeito ou um alarme indica a ocorrência da anomalia. Assim, durante o processo, ocorrendo um travamento no sistema, o controle tenta a correção deste defeito ou falha, sem que o processo deva retornar novamente a seu início. O operador tem a opção de passar o comando para manual e tentar corrigir o defeito, sem que a seqüência do processo seja alterada. Esta informação de anomalia é dada por meio de um sinal sonoro e de informação escrita na tela, sempre que algo não acontecer como o previsto pelo operador. No modo manual, há também a possibilidade de se fazer manutenções rotineiras sem necessidade de ligar todo o sistema.

O sistema possui diversas vantagens, a saber:

- Condições de controle em três linhas independentes, caso haja necessidade, sendo uma para cada tipo de alvo.
- Sistema de controle unificado, para os três tipos de alvos, em diferentes geometrias.
- Segurança operacional e confiabilidade.
- Redução significativa da taxa de exposição a que o trabalhador fica submetido.
- Retirada automática do alvo, com gerenciamento e supervisão por meio do computador.
- Indicação da incidência do feixe no alvo, com controle de sua homogeneidade e perfil, por intermédio das correntes nos colimadores e quatro setores.
- Controle da temperatura e pressão no alvo durante a irradiação.

Diversas características podem ser destacadas, quando se utiliza um processo comandado por lógica de CLP:

- Componentes integrados, com fácil acesso para manutenção e operação.
- Dispositivos menos complexos, menor probabilidade de ocorrência de problemas.
- Sistema *user friendly* (CLP com Interface Homem-Máquina - IHM): operadores têm acesso a todas as informações.
- *Status* do processo, tendências, monitoração *online* de variáveis, tais como, corrente, temperatura, pressão, etc.
- Facilidade de manutenção, por meio de informações estatísticas dos pontos críticos, onde o operador pode obter uma lista para atuação na manutenção preventiva do equipamento.
- Possibilidade de aplicar o conceito de "zero defeito".
- Auxílio na implantação da ISO 9000.
- Redução nos custos de fiação, instalação, operação e manutenção.
- Maior segurança nas medições, diminuição de equipamentos de medidas.
- Independência de análises do operador, isto é, não se necessita de mão-de-obra altamente especializada.
- Diagnóstico de falhas.
- Facilidade de manutenção e implementação de novos controles e processos, sem alteração significativa no arranjo físico da instalação.

Em virtude das características citadas anteriormente, conseguiu-se com este projeto além de realizar automaticamente a operação para a irradiação de alvos sólidos, líquidos e gasosos, atingir outros benefícios:

- Domínio da tecnologia de automação, utilizando técnicas mais modernas.
- Melhoria do desempenho dos equipamentos, integração dos processos e seus limites e redução de parada por erro humano.
- Facilidade de repetir processos, sem necessidade de realizar *setups* do equipamento.
- Flexibilização de controle de processos totalmente diferentes, com tempo de *setup* pequeno.

O domínio da tecnologia foi alcançado com:

- Uso de sensores modernos, mais eficientes, precisos e resistentes.
- Controle por CLP, aumentando a flexibilidade e diminuindo o tempo para

reestruturação do sistema de comando (no caso de intenção de ampliar o número de processos).

- Sistema de Monitoração e Gerenciamento, proporcionando a interação homem-máquina, com informações *online* mais precisas e tratando estas informações de modo a melhorar o desempenho do sistema como um todo.

Com a implementação de uma automação deste tipo, pode-se obter, uma melhoria da capacidade de produção de radioisótopos, possibilitando:

- Ampliar o número e/ou a quantidade de radioisótopos produzidos.
- Utilizar informações para realizar manutenção pró-ativa (preventiva), por meio de análises estatísticas dos pontos de falhas, diminuindo a manutenção reativa (corretiva) e, consequentemente, reduzindo o número de defeitos e aumentando a disponibilidade do equipamento para as irradiações.
- Diminuir o tempo para execução da produção, aumentando a capacidade produtiva destes radioisótopos.

A capacidade de aumentar a produção, com redução de custos e alta qualidade possibilitam, consequentemente, um aumento de competitividade no mercado, com maior faturamento que, com certeza, é o melhor benefício encontrado na implementação deste projeto.

Em ambientes competitivos, exigem-se cada vez mais sistemas de alta performance, capazes de garantir economia e eficiência. Plenamente incorporado a essa realidade, o sistema desenvolvido assegura o controle dos dispositivos de irradiação, reagindo rapidamente a falhas ou mesmo permitindo eventuais adaptações em resposta a novas demandas.

Um outro parâmetro que pode ser ressaltado neste conceito de automação é algum tipo de integração da produção (*mix*) com o sistema administrativo da empresa, como planejamento, expedição e venda de produtos acoplados em uma rede comum. Esta integração garante redução do tempo de comunicação entre as áreas, melhor planejamento para a produção, agiliza as informações entre o departamento comercial e o departamento de produção, com o objetivo de melhor atender o mercado (prazos e custos otimizados).

A tecnologia de automação mostra-se uma fonte de mudança drástica que está afetando rapidamente todos os aspectos do controle e da instrumentação industrial, pois viabiliza um meio de interconexão de dispositivos de campo, a um custo muito baixo, aliado a uma grande liberdade de configuração, proporcionando uma considerável economia de tempo e investimentos. A tecnologia de automação é, sem dúvida, um elemento fundamental para o aumento da eficiência das plantas industriais.

O domínio da tecnologia de automação é benéfico porque normalmente era necessário ter uma relação constante do usuário com os fornecedores, sempre que se quisesse realizar uma otimização do processo ou manutenção. Com este domínio, isto não é mais necessário, podendo ser feita pelo próprio usuário. A tendência, agora, é substituir os sistemas antigos, passando para o controle com CLP.

Na área de automação, as mudanças relacionadas ao domínio e ao uso mais intensivo de tecnologias de processos puderam ser percebidas significativamente na última década. No caso do IPEN, foram importadas plantas inteiras, completas, em termos de processo de automação. Por esta razão, era comum encontrar nestes segmentos sistemas de controle que, segundo o operador, passaram por sérios problemas quando as substituições por manutenção ou modificações começaram a ser necessárias.

O principal resultado da implantação deste sistema é a independência de se ter operadores especialistas em irradiação de alvos, simplificando o perfil do operador, reduzindo custos e aumentando as opções deste recurso.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP IPEN

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

A automação de sistemas de irradiação apresentada no presente trabalho abrange uma variedade de parâmetros de interface homem-máquina, desde painéis de controle e campo até a arquitetura dos *softwares*, sempre procurando atender às necessidades específicas que cada caso exigia. Os dispositivos foram escolhidos de tal forma a representar um compromisso entre a tecnologia de ponta do mercado internacional e a realidade brasileira, buscando sempre uma relação custo/benefício conveniente com as necessidades básicas de cada aplicação em particular.

Seguiu-se a tendência adotada nos sistemas de irradiação de alvos para a produção de radioisótopos, com uma construção compacta do painel de campo que, além de conter todos os elementos, tais como, válvulas, cilindros pneumáticos, seringas, etc., servia como suporte dos porta-alvos.

O sistema desenvolvido conta com alta tecnologia em CLP, que alia conforto e praticidade para os operadores, os quais podem administrar o processo por intermédio de um computador, com a ajuda de um Sistema Supervisório. Assim, mediante uma interface gráfica animada e de alta definição, o sistema fornece informações claras e objetivas de toda a operação, permitindo identificar e corrigir qualquer anormalidade instantaneamente.

No sistema desenvolvido, todas as funções necessárias para a utilização dos respectivos dispositivos de irradiação, solicitadas pela interface Operador-PC, são realmente executadas pelo sistema via CLP, seguindo a lógica de controle determinada e, em qualquer anomalia durante o processo, uma realimentação tenta corrigir o defeito. Assim, durante o processo, ocorrendo um travamento no sistema, o controle faz a correção deste defeito ou falha, sem que o processo deva retornar novamente a seu início. Caso o controle não consiga corrigir, o operador tem a opção de passar o comando para manual e reparar o defeito, sem que a seqüência do processo seja alterada. Esta informação de anomalia é dada por meio de um alarme com um sinal sonoro e é escrita na tela do computador, sempre que algo não acontecer como o previsto pelo operador. No modo manual,

há também a possibilidade de se fazer manutenções rotineiras sem necessidade de ligar todo o sistema.

O sistema possui diversas vantagens, a saber:

- Condições de controle em três linhas independentes, caso haja necessidade, sendo uma para cada tipo de alvo.
- Sistema de controle unificado, para os três tipos de alvos, em diferentes geometrias.
- Segurança operacional e confiabilidade.
- Redução significativa da taxa de exposição a que o trabalhador fica submetido.
- Retirada automática do alvo, com gerenciamento e supervisão por intermédio do computador.
- Indicação da incidência do feixe no alvo, com controle de sua homogeneidade e perfil, por meio das correntes nos colimadores e quatro setores.
- Controle da temperatura e pressão no alvo durante a irradiação.

Além disto, é importante mencionar o domínio em termos de automação, que cada vez mais será aplicada no controle de processos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ARAUJO, S. G; ***Otimização do Sistema de Alvo Interno do Ciclotron CV-28 do IPEN - CNEN/SP.*** 1996. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

2. CLAYTON, C.G. Some coments on the development of radiation and radioisotope measurement applications in industry. ***Int. J. Appl. Rad. Isot.***, v.34, n.12, p.917-934, 1990.

3. LAMBRECHT, R.M.; SAJJAD, M.; SYED, R. H.; MEYER, W. Target preparation and recovery of enriched isotopes for medical radionuclide production. ***Nucl. Inst. Meth. in Phys. Res.***, v. A282, p.296-300,1989.

4. QAIM, S.M. Target development for medical radioisotope production at a cyclotron ***Nucl. Inst. Meth in Phys. Res.***, v. 41, n.10 -11, p.289-295, 1989.

5. WORKSHOP ON TARGETRY AND TARGET CHEMISTRY. 1., October 4-7, 1985. ***Proceedings...*** Heidelberg: Deutsches Krebsforschungszentrum, 1985.

6. WORKSHOP ON TARGETRY AND TARGET CHEMISTRY. 2, September 22-25, 1987. ***Proceedings...*** Heidelberg: Deutsches Krebsforschungszentru, 1987

7. WORKSHOP ON TARGETRY AND TARGET CHEMISTRY. 4, September 9-12, 1991. ***Proceedings...*** Villigen: Regin Weinreich,1991.

8. LANDINI, L. ***Estudo da Produção de ^{57}Co e ^{109}Cd em Ciclotron.*** 2000. Tese (Doutorado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

9. THE CYCLOTRON CORPORATION. ***Instruction and Service Manual for the Cyclotron Corporation's - Model CV-28 Cyclotron - Ser. NO. 604.*** US Pat. (TCC Ins-26), nov. 12, 1976.

10. CLARK, J. C.; Targetry automation. In: WORKSHOP ON TARGETRY AND TARGET CHEMISTRY. 2, September 22-25, 1987. ***Proceedings...*** Heidelberg: Deutsches Krebsforschungszentru 1987. p. 64-80.

11. ERDMAN, K. The ECBO technologies isotope production system. In: IV TH INTERNATIONAL WORKSHOP ON TARGETRY AND TARGET CHEMISTRY, September, 9-12, 1991, Switzerland. ***Proceedings...*** Switzerland: Regin Weinreich,1992. p. 27-31.

12. PADGETT, H.C.; KRETZ; P. R.; PEKRUL, E.; CARROLL, L. R. Automation of cyclotron, target and chemistry system operations. In: WORKSHOP ON TARGETRY AND TARGET CHEMISTRY. September 22-25, 1987 - ***Proceedings...*** Heidelberg: Deutsches Krebsforschungszentru, 1987. p.99-102

13. ZEISLER, S. K.; RUTH, T.J.REKTOR, M.P.;GSCHWANDTNER, G. A. Detectors and transducers for target operation and automated P.E.T. chemistry. In: FIFTH INTERNATIONAL WORKSHOP ON TARGETRY AND TARGET CHEMISTRY, September 19-23, 1993, Upton. ***Proceedings...*** Upton: BNL,1994. p. 249 -261.

14. FIROUZBAKT, M. L.; SCHLYER, S. J.; WOLF, A. P. The yield of F-18 from different target designs in the $^{18}O(p,n)^{18}F$ reaction on frozen $[^{18}O]CO_2$. In: FIFTH INTERNATIONAL WORKSHOP ON TARGETRY AND TARGET CHEMISTRY, September 19-23, 1993, Upton. ***Proceedings...*** Upton: BNL,1994. p. 68-77.

15. PIRART, C.; Technologies relevant to commercial radioisotopes production.In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NON - ENERGETIC APPLICATIONS

OF NUCLEAR SCIENCE- BRUSSELS, June 1-3, 1995, ***Proceedings...*** Brussels: BNS, 1995.

16. QAIM, S. M. Production of Radioisotopes Using Accelerators. In: THE 2ND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCED NUCLEAR ENERGY RESEARCH - EVOLUTION BY ACCELERATORS, January 24-26, 1990 Mito. ***Proceedings...*** Tokyo: Japan Atomic Energy Institute, 1990. p. 98-107, (INIS-MF-12714).

17. URANIUM INFORMATION CENTRE. Disponível em: <http://www.uic.com.au/mp26.htm>. Acesso em: 12 nov. 2000.

18. YONGEN, Y ; COHILIS, P. Use of Accelerators for Radioisotope Production. BNS – SFEN, CONFERENCE IN BRUSSELS, 1995. p.1-8.

19. SAJJAD, M.; LAMBRECHT, R.M. Cyclotron Production of Medical Radionuclides. ***Nucl. Inst. Meth. in Phys. Res.***, v. B79, p.911-915,1993.

20. PHELPS, E. M. PET: The merging of biology and imaging into molecular imaging. ***Journal of Nuclear Medicine***, v. 41, p. 661-681, 2000

21. ERNEST LAWRENCE'S CYCLOTRON. Disponível em: <http://www.lbl.gov/Science-Articles/archive/early-years.html>. Acesso em: 19 mai. 2000.

22. YONGEN, Y. Some Important Applications of accelerators in Medicine and Industry. ***7e Journées d'Etudes SATURNE, Ramatuelle***, 29 janvier – 2 février 1996, p.111-119.

23. SAJJAD, M.; LAMBRECHT, R.M.;Cyclotron Targetry for Medical Radioisotope Production. ***Nucl. Inst. Meth. in Phys. Res.***, v. B40/41, p.1100-1104, 1989.

24. MESTINIK, S. A.C.; MENGATTI, J.M. Studies for the Production of Iodine-123 at the CV-28 Cyclotron of the IPEN-CNEN/SP. In: IV TH INTERNATIONAL WORKSHOP ON TARGETRY AND TARGET CHEMISTRY, September, 9-12, 1991, Switzerland. ***Proceedings...*** Switzerland: Regin Weinreich,1992. p. 4-10.

25. OSSO Jr., J. A. ***^{77}Br Isotope Production for Medical Use.*** Manchester, England. 1986. Doctor of Phylosophy – Faculty of Science, University of Manchester.

26. SANTOS, L. L. M. ; ***Desenvolvimento de Sistema de Irradiação de Água Natural para a Produção de ^{18}F no Ciclotron do IPEN.*** 1994. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

27. QAIM, S.M.; STÖCKLIN, G. Production of Some Medically Important Short-Lived Neutron-Deficient Radioisotopes of Halogenes. ***Radiochim. Acta***, v.34, p.25-40, 1983.

28. Publicação da Festo Automação Ltda - ***Festo Atual***, n. 42 , 2000 – São Paulo.

29. Aparelho de Automatização Simatic S5-110 6ES5110 - ***Manual do Usuário SIEMENS*** – São Paulo.

30. H&P-Automação Industrial – ***Informativo da Câmara Setorial de Equipamentos para Automação Industrial da Abimaq***, n. 4 – mar/abr 2000.

31. Tools For Automation Indusoft Technical Reference – Unisoft – ***Referência Técnica – Unisoft Sistemas Ltda.***,1997, Brasil.

32. FILGUEIRAS, L. V.L.- Interfaces Homem-Máquina no Controle de Processos: Situação e Perspectivas de Desenvolvimento. No: **ANAIS DO 3º**

CONGRESSO NACIONAL DE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL, 19-23 Set., 1988, São Paulo. ***Anais...*** São Paulo. 1988. p. 149-180.

33. MICHAEL, H.; ROSEZIN, H.; APELT, H.; BLESSING, G.; KNIEPER, J.;QAIM, S. M. Some technical improvements in the production of ^{123}I via the ^{124}Te (p,2n) ^{123}I reaction at a compact cyclotron. ***Int. J. Appl. Radiat. Isot.***, v.32, n.8, p. 581-587, 1981.

34. SHEFER, R. E.; KLINKOWSTEIN, R. E.; HUGHEY, B. J. Production of PET radionuclides with a high current eletrostatic accelerator. The ECBO technologies isotope production system. In: IV TH INTERNATIONAL WORKSHOP ON TARGETRY AND TARGET CHEMISTRY, september, 9-12, 1991, Switzerland. ***Proceedings...*** Switzerland: Regin Weinreich,1992. p. 4-10.

35. HERSCHEID, J. D. M.; VAN ROOIJ, L. F.; VAN LEUFFEN, P. J.; CAMPS, J. A. J. A New High Flow $^{81}Rb/^{81m}Kr$ Generator. ***Appl. Radiat. Isot.***, v. 43, n. 10, p.1203-1205, 1992.

36. LEPERA, C. E. G.; DEMBOWSKI, B. Production of [^{18}F]Fluoride with a High-pressure Disposable [^{18}O]Water Target. ***Appl. Radiat. Isot.,*** v.48, n. 5, p.613-617, 1997.

37. FISER, M.; HANC, P.; LEBEDA, O.; HRADILEK, P.; KOPICKA, K. Development and Production of $^{81}Rb/^{81m}Kr$ Radionuclide Generator in NPI. Czechoslovak ***Journal of Physics,*** v. 49 (Suppl. S1), p. 811-816, 1999.

38. FIROUZBAKHT, M. L.; SCHLYER, D. J.; WOLF, A. P.; FOWLER, J. S. Mechanism of Nitrogen-13-Labeled Ammonia Formation in a Cryogenic Water Target. ***Nuclear Medicine and Biology,*** v.26, p.437-441, 1999.

39. BERRIDGE, M. S.; KJELLSTRÖM, R. Designs and use of silver [^{18}O]water targets for [^{18}F]fluoride production. ***Appl. Radiat. Isot.,*** v. 50, p. 699-705, 1999.

40. O'NEIL, J. P.; VANBROCKLIN, H. F. Preparation of Fluorine-18 gas from an 11MeV Cyclotron: a Target System for the CTI RDS 111 Cyclotron. ***Nucl. Instrum. Meth. Phys. Resear. A,*** v.438, p.166-172, 1999.

41. FIROUZBAKHT, M.L.; SCHLYER, D. J.; FOWLER, J.S.Irradiation of Ammonia at Liquid Nitrogen Temperatures The Mechanistic Implications for Direct Production of (^{11}C)HCN. In: EIGHTH INTERNATIONAL WORKSHOP ON TARGETRY AND TARGET CHEMISTRY. ***Proceedings...*** St. Louis, 1999. p.182-183.

42. HESS, E.; BLESSING, G.; COENEN, H.H.; QAIM, S.M. Some Optimisation Studies on The Production Of (^{18}F)F^{2} Via The ^{18}O(pn)^{18}F Process. In: EIGHTH INTERNATIONAL WORKSHOP ON TARGETRY AND TARGET CHEMISTRY. ***Proceedings...*** St. Louis, 1999. p.38-39.

43. RUTH, T.J.; BUCKLEY, K.R.; HURTADO, J.; JIVAN,S.Targetry for the Production of Ultra High Quantities of ^{18}F-Fluoride: A Work in Progress. In: EIGHTH INTERNATIONAL WORKSHOP ON TARGETRY AND TARGET CHEMISTRY. ***Proceedings...*** St. Louis, 1999. p.41-43.

44. HESS, E.; BLESSING, G.; COENEN, H. H.; QAIM, S. M. Improved target system for production of high purity [^{18}F]fluorine via the ^{18}O(p,n)^{18}F reaction. ***Appl. Radiat. Isot.***, v.52, p. 1431-1440, 2000.

45. HELMEKE, H. J.; HARMS, T.; KNAPP, W. H. A water target with beam sweep for routine fluorine-18 production. ***Appl. Radiat. Isot.,*** v.54, p. 753-759, 2001.

46. CLEMENTS-JEWERY, K.; JEFFCOAT, W. ***The PLC Workbook*** - Programmable Logic Controllers Made Easy. Prentice Hall, London, UK, 1996, p. 197.

47. RULLÁN, A. Programmable Logic Controls versus Personal Computers for Process Control. ***Computers ind. Eng.***, v. 33, n. 1-2, p.421-424, 1997.

48. SONNLEITNER, B. Bioprocess automation and bioprocess design. ***Journal of Biotechnology***, v.52, p. 175-179, 1997.

49. GAEHLE, G. G WELCH, M. J.;. New Approaches to the Control of Accelerators and Production Systems. In: SEVENTH INTERNATIONAL WORKSHOP ON TARGETRY AND TARGET CHEMISTRY. ***Proceedings...*** Heidelberg: Deutsches Krebsforschungszentru 1997. p.18-19.

50. SASAKI, M.; KAGEOKA, T.; OGURA, K.; KATAOKA, H.; UETA, T.; SUGIHARA, S. Total laboratory automation in Japan past, present and future. ***Clinica Chimica Acta,*** v.278, p. 217-227, 1998.

51. FELDER, R. A. Modular workcells: modern methods for laboratory automation. ***Clinica Chimica Acta***, v.278, p.257-267, 1998.

52. DU, X. H.; ZHOU, C. Message-oriented decomposition for supervisory control in manufacturing system. ***Robotics and Computer Integrated Manufacturing***, v.15, p. 441-452, 1999.

53. SHEN, L-C.; HSU, P-L. An intelligent supervisory system for ion implantation in IC fabrication process. ***Control Engineering Practice,*** v. 7, p. 241-247, 1999.

54. HICHWA. R.D. Radiopharmaceutical Automation: Sensors and Technology VS The Human Experience. In: EIGHTH INTERNATIONAL WORKSHOP ON TARGETRY AND TARGET CHEMISTRY. ***Proceedings...*** St. Louis, 1999. p.59-60.

55. LIN, C. Y-Y.; CHEN, W-H. The effect of social factors on the implementation of automation: an empirical study in Taiwan. ***J. Eng. Technol. Manage***, v.17, p.39-58, 2000.

56. GILLESPIE, G. H.; BARREY, W. H.; MARTONO, H.; MOORE, J. M. Recent Advances in Software for Beamline design, Accelerator Operations and Personnel training. ***Nucl. Instrum. Meth. Phys. Resear. B***, v. 161-163, p.1168-1173, 2000.

57. SINGLACHAR, R.; MUKHERJEE, B. An advanced PC-PLC-based SCADA system for a commercial medical cyclotron. ***Nucl. Instrum. Meth. Phys. Resear. A***, v.399, p. 396-406, 1997.

58. SHEFER, R. E.; KLINKOWSTEIN, R. E.; HUGHEY, B. J.; FRIED, N. A.; McCARTHY, D. W.; SCHWARZ, S. W.; ANDERSON, C. J.; WELCH, M. J. Automated Solid Targets and Processing Systems for the Production of Intermediate-Lived Radionuclides. In: SEVENTH INTERNATIONAL WORKSHOP ON TARGETRY AND TARGET CHEMISTRY ***Proceedings...*** Heidelberg: Deutsches Krebsforschungszentru 1997. p. 200-202.

59. DAVENPORT, R. J.; DOWSETT, K.; PIKE, V. W. A Simple Technique for the Automated Production of No-carrier-added [1-^{11}C]Acetate. ***Appl. Radiat. Isot.***, v.48, n. 8, p. 1117-1120, 1997.

60. HAMMOND, R. G.; RENTON, M. L.; MACKAY, D. B.; WATERS, S. L. Design and Operation of a Krypton-82 Gas Target for the Regular High Yield Production of Rubidium-81 for the Preparation of Krypton-81m Generators. In: SEVENTH INTERNATIONAL WORKSHOP ON TARGETRY AND TARGET CHEMISTRY. ***Proceedings...*** Heidelberg: Deutsches Krebsforschungszentru 1997. p. 51-54.

61. MEDEMA, J.; LUURTSEMA. G.; KEIZER, H.; TILKEMA, S.; ELSINGA, P. H.; FRANSSEN, E. J. F.; PAANS, A. M. J.; VAALBURG, W. Fully Automated and Unattended [^{18}F]Fluoride e Unattended [^{18}F]FDG Production Using PLC

COMISSAO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP IPEN

Controlled Systems. In: SEVENTH INTERNATIONAL WORKSHOP ON TARGETRY AND TARGET CHEMISTRY ***Proceedings...*** Heidelberg: Deutsches Krebsforschungszentru 1997. p.23-25.

62. BLESSING, G.; TÁRKÁNYI, F.; QAIM, S.M. Production of ^{82m}Rb via the ^{82}Kr (p,n) – process on highly enriched ^{82}Kr: a remotely controlled compact system for irradiation safe handling and recovery of the target gas and isolation of the radioactive product. ***Int. J. Appl. Radiat. Isot.***, v.48, n.1, p.37-43, 1997.

63. SUZUKI, K.; YOSHIDA, Y.; SHIKANO, N.; KUBODERA, A. Development of an automated system for the quick production of ^{13}N-labeled compounds with high specific activity using anhydrous $[^{13}N]NH_3$. ***Appl. Radiat. Isot.***, v. 50, p. 1033-1038, 1999.

64. HARA, T.; YUASA, M. Automated synthesis of [^{11}C]choline, a positron-emitting tracer for tumor imaging. ***Appl. Radiat. Isot.***, v. 50, p. 531-533, 1999.

65. STEEL, C. J.; BRADY, F.; LUTHRA, S. K.; BROWN, G.; KHAN, I.; POOLE, K. G.; SERGIS, A.; JONES, T.; PRICE, P. M. An automated radiosynthesis of 2-[^{11}C]thymidine using anhydrous [^{11}C]urea derived from [^{11}C]phosgene. ***Appl. Radiat. Isot.***, v.51, p. 377-388, 1999.

66. STEEL, C. I.; RENTON, M. L.; PIKE, V. W. Semi-intelligent control of automated synthesis using a Toshiba EX40+PLC. In: EIGHTH INTERNATIONAL WORKSHOP ON TARGETRY AND TARGET CHEMISTRY. ***Proceedings...*** St. Louis, 1999. p. 95-97.

67. SAITO, F.; SUZUKI, N.; ITOH, Y.; GOTO, A.; FUJIWARA, I.; KURIHARA, T.; IWATA, R.; NAGASHIMA, Y.; HYODO, T. Automatic ^{18}F positron source supply system for a monoenergetic positron beam. ***Radiat. Phys. Chem.***, v. 58, p. 755-757, 2000.

68. ZEISLER, S. K.; BECKER, D. W.; PAVAN, R. A.; MOSCHEL, R.; RÜHLE, H. A water-cooled spherical niobium target for the production of [^{18}F]fluoride. ***Appl. Radiat. Isot.,*** v. 53, p. 449-453, 2000.

69. BERGMAN, J.; ESKOLA, O.; LEHIKOINEN, P.; SOLIN, O. Automated synthesis and purification of (^{18}F)bromofluoromethane at high specific radioactivity. ***Appl. Radiat. Isot.,*** v. 54, p. 927-933, 2001.

70. LUCKI, G.; ZANCHETTA, A.A.; GOUVEIA, S.; KLEIN, H. Isochrouns Variable Energy Cyclotron of IPEN-CNEN/SP – Installation, uses and perspectives. In: IV JAPAN – BRAZIL SYMPOSIUM ON SCIENCE AND TECHNOLOGY, VOL. IV – APPLICATION OF RADIATION AND RADIOISOTOPES, 1984, São Paulo. ***Proceedings...*** São Paulo: Academia de Ciências do Estado de São Paulo – SP, 1984. p. 146-151.

71. ION BEAM APPLICATIONS. ***Cyclone 30 - Operations Manual.*** Version IT 2.0 – maio, 1995. IBA. Louvain La Neuve, Bélgica.

72. KAWAI, K. An Intelligent Multimedia Human Interface for Highly Automated Combined-Cycles Plants. ***Control Engineering Practice***, v. 5, p.401-406, 1997.

73. The SSCL process control system , T. Moore, R. Bork, J. Heefner, S. Basiti. Nucl. Inst. Meth. in Phys. Res. A, - In: THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACCELERATOR AND LARGE EXPERIMENTAL PHYSICS CONTROL SYSTEMS October 18-23, 1993, Berlin, Germany. ***Proceedings...*** North-Holland, 1994, v. 352 , p. 50-52.

74. IMOTO, J.I.- Fundamentos do Controle Integrado de Processo e de Produção. No: **3º CONGRESSO NACIONAL DE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL,** 19-23 Set., 1988, São Paulo. ***Anais...*** São Paulo. 1988. p.27-69.

75. ***Manual do Usuário SIEMENS.*** Aparelho de Automatização *SIMATIC* S5-110 6ES5110 – São Paulo

76. SIEMENS AG, 2000, Automation & Drives. Disponível em: <http://www.siemens.com> Acesso em: 8 dez. 2000.

77. SIEMENS SIMATIC – S7-300 and M7-300, Programmable Controllers, Module Specifications. ***Reference Manual- SIEMENS AG,*** 1998, Germany.

78. SIEMENS SIMATIC Software – System Software For S7-300 and S7-400, Systems and Standart Functions. ***Reference Manual- SIEMENS AG,*** 1996, Germany.

79. SIEMENS SIMATIC Software – System Software For S7-300 and S7-400, Program Design. ***Programming Manual- SIEMENS AG***, 1996, Germany.

80. SIEMENS SIMATIC Software – Ladder Logic (LAD) for S7-300 and S7-400. ***Programming, Manual- SIEMENS AG***, 1996, Germany.

81. SIEMENS SIMATIC Software – Statement List (STL) for S7-300 and S7-400. ***Programming, Manual- SIEMENS AG***, 1996, Germany.

82. SIEMENS SIMATIC Software – Function Block Diagram (FDB) for S7-300 and S7-400. ***Programming, Manual- SIEMENS AG,*** 1996, Germany.

APÊNDICE

Autores	Michael et al	Shefer et al	Herscheid et al	Firouzbakht et al	Lepera et al
Ano (Referência)	1981 (33)	1991 (34)	1991 (35)	1993 (14)	1997 (36)
Equipamento	Cíclotron CV-28	Acelerador Linear Tandem	Cíclotron	Cíclotron 60"	Cíclotron JSW BC3015
Local	Jülich-Alemanha	Research Lab.-EUA	Amsterdam-Holanda	BNL-EUA	Philadelphia-EUA
Produto	^{123}I	^{18}F	$^{81}Rb/^{81m}Kr$	^{18}F	^{18}F
Atividade (GBq)	3,7 - 4,4	37	----------	----------	37
Reação	$^{124}Te(p,2n)^{123}I$	$^{18}O(p,n)^{18}F$	$^{82}Kr(p,2n)^{81}Rb$	$^{18}O(p,n)^{18}F$	$18O(p,n)^{18}F$
Energia (MeV)	22,4 - 20	3,7 - 2,5	----------	17,4	até 90
Corrente (μA)	30	740	----------	18 máx.	25 máx.
Tempo (min)	60	110	----------	10	37,103
Alvo (% Pureza)	^{124}Te (>99%)	----------	^{82}Kr (>99,92%)	----------	^{18}O (97,5%)
Massa/Volume/Densidade	150 mg	39 mg	----------	----------	0,5 cm^3
Forma Química do Alvo	TeO_2	H_2O	Kr_2	$[^{18}O]CO_2$	H_20
Estado Físico	Sólido	Sólido	Gasoso	Sólido	Líquido
Suporte	fundido em placa de Pt	porta-alvo cônico	----------	porta-alvo cônico	cônico cobre niquelado
Refrigeração	água 4π	nitrogênio líquido	----------	nitrogênio líquido	----------
Automação/Controle	pneumático	----------	----------	----------	----------
Comentários	----------	----------	Sobre Gerador	----------	----------

Autores	Fiser et al	Firouzbakht et al	Berridge et al	O'Neil et al	Firouzbakht et al
Ano (Referência)	1999 (37)	1999 (38)	1999 (39)	1999 (40)	1999 (41)
Equipamento	Cíclotron U-120M	Cíclotron 60"	Scanditronix MC17	RD112 CTI	Cíclotron 60"
Local	NPI-Checoslováquia	BNL-EUA	Cleveland-EUA	LBNL-EUA	BNL-EUA
Produto	$^{81}Rb/^{81m}Kr$	^{13}N	^{18}F	^{18}F	^{11}C
Atividade (GBq)	18	1,29	29,6 normal	18,5 (40μA)	----------
Reação	Kr(p,2n)Rb	$^{16}O(p,\alpha)^{13}N$	$^{18}O(p,n)^{18}F$	$^{18}O(p,n)^{18}F$	$^{14}N(p,\alpha)^{11}C$
Energia (MeV)	31	18	17	10	----------
Corrente (μA)	15	20 máx.	15	20 a 40	----------
Tempo (min)	300	----------	45	40 a 60	----------
Alvo (% Pureza)	^{nat}Kr	CO_2 (>99%) / H_2O	----------	$^{18}O_2$ (>97%)	----------
Massa/Volume/Densidade	23,6mL	2 a 10mL p/ H_2O	0,5-1,2mL	----------	----------
Forma Química do Alvo	Kr_2	CO_2 / H_2O	H_2O	$^{18}O_2$	HCN
Estado Físico	Gasoso	Sólido	Líquido	Gasoso	Sólido
Suporte	cilíndrico de alumínio	cônico de prata	prata	cilíndrico de alumínio	----------
Refrigeração	água	nitrogênio líquido	água e hélio	água e hélio	nitrogênio líquido
Automação/Controle	controle com PC	----------	----------	não cita o tipo	----------
Comentários	Produção de Gerador	Dois tipos de alvos	Vários porta-alvos	----------	----------

Autores	Hess et al	Ruth et al	Hess et al	Helmeke et al	Clark
Ano (Referência)	1999 (42)	1999 (43)	2000 (44)	2001 (45)	1987(10)
Equipamento	Ciclotron CV-28	Ciclotron TRIUMF - EBCO	Ciclotron CV-28	Cicl. Scanditronix mc35	Ciclotron MRC
Local	Jülich-Alemanha	Vancouver - Canadá	Jülich-Alemanha	Hannover-Alemanha	Londres-Inglaterra
Produto	^{18}F	^{18}F	^{18}F	^{18}F	$^{18}F/^{11}C$
Atividade (GBq)	37	> 370 (teórico)	34	----------	----------
Reação	$^{18}O(p,n)^{18}F$	$^{18}O(p,n)^{18}F$	$^{18}O(p,n)^{18}F$	$^{18}O(p,n)^{18}F$	----------
Energia (MeV)	10 a 20	18	16	17	----------
Corrente (μA)	20	100	5 a 20	30	----------
Tempo (min)	120	180	15 a 20	60	----------
Alvo (% Pureza)	^{18}O (97%)	----------	^{18}O (97%)	^{18}O (94%)	----------
Massa/Volume/Densidade	30 mL	----------	30 mL	2,06 mL	----------
Forma Química do Alvo	$^{18}O_2$	$^{18}O_2$	$^{18}O_2$	H_2O	----------
Estado Físico	Gasoso	Gasoso	Gasoso	Líquido	----------
Suporte	cônico em alumínio	----------	cônico liga $AlMg_3$	oval em titânio	----------
Refrigeração	água	----------	água 4π	água e hélio	----------
Automação/Controle	----------	----------	----------	----------	CLP
Comentários	janela esférica	----------	janela esférica	não cita valor de enriq.	Frisa síntese

Autores	Padgett et al	Erdman	Zeislers et al	Singlachar et al	Shefer et al
Ano (Referência)	1987 (12)	1991 (11)	1993 (13)	1997 (57)	1997 (58)
Equipamento	Ciclotron RDS	Ciclotron TR 30	Ciclotron TR 30	Cyclone 30	Ciclotron Biomédico
Local	CTI-Berkeley-EUA	Vancouver-Canadá	Vancouver-Canadá	Sydney - Austrália	St. Louis - EUA
Produto	^{18}F	$^{18}F, ^{15}O, ^{13}N, ^{11}C$	^{18}F	$^{201}Tl, ^{67}Ga, ^{123}I, ^{18}F, ^{13}N, ^{15}O$	^{64}Cu
Atividade (GBq)	----------	----------	----------	----------	----------
Reação	$^{18}O(p,n)^{18}F$	$^{18}O(p,n)^{18}F$ $^{15}N(p,n)^{15}O$ $^{16}O(p,\alpha)^{13}N$ $^{14}N(p,\alpha)^{11}C$	$^{18}O(p,n)^{18}F$	----------	----------
Energia (MeV)	----------		----------	----------	----------
Corrente (μA)	----------		----------	----------	----------
Tempo (min)	----------		----------	----------	----------
Alvo (% Pureza)	----------	----------	^{18}O (95%)	----------	----------
Massa/Volume/Densidade	----------	----------	300 μL	----------	----------
Forma Química do Alvo	H_2O	H_2O , N_2, H_2O, N_2 (respectiv.)	H_2O	----------	Ni
Estado Físico	Líquido	----------	Líquido	----------	Sólido
Suporte	----------	----------	titânio	----------	eletrodepositado em Au
Refrigeração	----------	água	água	----------	água
Automação/Controle	PC - Programa Fortran	CLP - Allen Bradley	CLP e PC	CLP/SCADA	Pneumático
Comentários	Sobre Controle	Só fornece Reações	Sobre Controle	Informação de Controle	----------

Autores	Davenport et al	Hammond et al	Medema et al	Blessing et al	Suzuki et al
Ano (Referência)	1997 (59)	1997 (60)	1997 (61)	1997(62)	1998(63)
Equipamento	Cícl. Scanditronix MC40	Cícl. Scanditronix MC40	Scanditronix MC17	CV-28 /MGC 20 E	Cícl. NIRS HM-18
Local	Londres- Inglaterra	Londres- Inglaterra	Holanda	Alemanha /Hungria	Tóquio-Japão
Produto	^{11}C	$^{81}Rb/^{81m}Kr$	^{18}F	^{82m}Rb	^{13}N
Atividade (GBq)	1,4	10	29,6	370	----------
Reação	$^{14}N(p,\alpha)^{11}C$	$^{82}Kr(p,2n)^{81}Rb$	$^{18}O(p,n)^{18}F$	$^{82}Kr(p,n)^{82m}Rb$	$^{16}O(p,\alpha)^{13}N$
Energia (MeV)	19	30	17	14,8	17
Corrente (μA)	30	30	18	1 a 10	18
Tempo (min)	1	----------	60	60 a 120	25
Alvo (% Pureza)	----------	^{82}Kr (>90%)	enriq . ^{18}O	enriq . ^{82}Kr	----------
Massa/Volume/Densidade	----------	190 mL	1 mL	51,8 mL	1,9 mL
Forma Química do Alvo	N_2 + 0,1% O_2	Kr_2	$^{18}O_2$	Kr_2	O_2
Estado Físico	Gasoso	Gasoso	Líquido	Gasoso	Gasoso
Suporte	----------	cônico de alumínio niquelado	Al e Ag	cônico de Ni alta pureza	----------
Refrigeração	----------	----------	----------	água e hélio	----------
Automação/Controle	CLP - SIEMENS	CLP	CLP- SIEMENS	não cita o tipo	----------
Comentários	Sobre síntese	janela dupla de alumínio	janela de Ag e Havar	janela dupla de Ni	Sobre síntese
Autores	**Hara et al**	**Steel et al**	**Saito et al**	**Zeisler et al**	**Bergman et al**
Ano (Referência)	1999 (64)	1999 (65)	2000 (67)	2000 (68)	2001 (69)
Equipamento	Ciclotron	Cícl. Scanditronix MC40	Ciclotron AVF	Cícl. Scanditronix MC 32	Cícl. AVF103 cm
Local	Japão	Londres- Inglaterra	Tóquio - Japão	Heidelberg - Alemanha	Finlândia - Turquia
Produto	^{11}C	^{11}C	^{18}F	^{18}F	^{18}F
Atividade (GBq)	26	129,5	----------	----------	18
Reação	$^{14}N(p,\alpha)^{11}C$	$^{14}N(p,\alpha)^{11}C$	$^{18}O(p,n)^{18}F$	$^{18}O(p,n)^{18}F$	$^{18}O(p,n)^{18}F$
Energia (MeV)	20	19	14	21	17
Corrente (μA)	30	30	1 a 1,6	10 a 52	10
Tempo (min)	10	30	60	13	45
Alvo (% Pureza)	N_2 (99,99%)	----------	----------	^{18}O (97%)	^{18}O (94%)
Massa/Volume/Densidade	----------	----------	----------	1,6 mL	400 a 700 μL
Forma Química do Alvo	N_2	N_2 + 5% H_2	H_2O	H_2O	H_2O
Estado Físico	----------	Gasoso	Líquido	Líquido	Líquido
Suporte	----------	câmara de alumínio	corpo Ti e disco de Ag	esférica de Nb	câmara de Ag
Refrigeração	----------	----------	água e hélio	água	----------
Automação/Controle	----------	CLP	PC	não cita	CLP
Comentários	Sobre síntese	Sobre síntese	janela de Havar	Sobre alvo	Sobre síntese

CNEN - ...AO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP ...